

Éléments majeurs des particules en suspension de la Méditerranée occidentale

Matière en suspension
Méditerranée occidentale
Éléments majeurs
Fraction biogène
Flux

Suspended matter
Western Mediterranean Sea
Major elements
Biogenic fraction
Flux

Claire COPIN-MONTÉGUT

Laboratoire de physique et chimie marines, Université Pierre et Marie Curie, UA
CNRS 353, BP 8, 06230 Villefranche-sur-Mer, France.

Reçu le 4/3/86, révisé le 20/10/86, accepté le 28/10/86.

RÉSUMÉ

Les particules en suspension dans l'eau de mer sont constituées essentiellement de matière biogène formée *in situ* et de matière terrigène. En Méditerranée, la répartition verticale des matières biogènes est caractéristique des zones tempérées oligotrophes. La zone de remontée d'eau profonde de la Mer d'Alboran est spécialement riche en carbone organique particulaire (COP). Sous la zone euphotique, COP est peu abondant, mais susceptible de varier avec la saison, ce qui indique un transport rapide des particules vers le fond. L'aluminium, traceur principal des apports continentaux, est présent en concentration très peu variable dans les eaux du large. Les fronts côtiers constituent des barrières pour les matières terrigènes.

Une analyse par régressions multiples permet de différencier les fractions terrigènes des fractions biogènes du silicium, fer et magnésium en suspension. La fraction de silicium biogène est importante mais variable suivant les zones de prélèvement. Les fractions biogènes de fer et de magnésium sont généralement faibles. Le calcium est associé dans des rapports variables à l'aluminium et aux matières biogènes, ce qui rend difficile la détermination de son origine.

La composition des particules en suspension récoltées par filtration a été comparée à celle des matières récoltées par un piège à sédiment dérivant.

Oceanol. Acta, 1988. Océanographie pélagique méditerranéenne, édité par H. J. Minas et P. Nival, 95-102.

ABSTRACT

Major elements of suspended particulate matter from the Western Mediterranean Sea

Chemical analyses of major elements (C, N, P, Si, Al, Fe, Ca, Mg) were performed on more than 500 samples of suspended matter from the Western Mediterranean Sea. Four samples collected with a free-floating sediment trap were also analysed.

The vertical distribution of particulate organic carbon, POC, reported herein is characteristic of oligotrophic mid-latitude regions. In open waters, the concentration of particulate aluminium is nearly constant ($Al_p = 22 \text{ nmole} \cdot l^{-1}$, $\sigma = 9 \text{ nmole} \cdot l^{-1}$). Near the coast, Al_p is higher. A fraction of particulate silicon Si_p is of terrigenous origin, the rest is biogenic. The ratio Si/Al (by atoms) in terrigenous material is estimated at 2, so $Si_{bio} = Si_p - 2 Al_p$. Si_{bio}/POC is lower in the euphotic layer than in the deep waters ($\geq 100 \text{ m}$), where it is nearly constant and ranges between 0.08 and 0.16 according to the sampling area.

The biogenic fraction of particulate iron and magnesium is noticeable only in the surface layer, where Fe_{bio}/POC and Mg_{bio}/POC ratios are about 10^{-3} . It is not possible to estimate the terrigenous and biogenic fractions of particulate calcium, as

the latter does not present the same distribution as the other particulate elements. The proportion of Ca in the particles is greater in areas where that of Si_{bio} is low. Large amounts of particulate organic matter and terrigenous material are observed in the surface waters of the Alboran Sea. The terrigenous material is drawn eastwards during sedimentation.

Comparison of sediment trap material with particulate matter collected by filtration at the same depth (200 m) shows an enrichment of Si in the trapped particles; the settling rates of POC and Al are of the same order of magnitude ($10 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$).

Oceanol. Acta, 1988. Océanographie pélagique méditerranéenne, édité par H. J. Minas et P. Nival, 95-102.

INTRODUCTION

Les particules en suspension dans les eaux de mer, formées essentiellement de matériaux biogènes ou terrigènes, jouent un rôle important dans le transport des éléments chimiques vers les eaux profondes. On distingue habituellement les petites particules (de diamètre inférieur à $50 \mu\text{m}$ environ) qui sédimentent lentement, mais constituent la plus grande partie des matières en suspension, des grosses particules ($\geq 50 \mu\text{m}$) qui sont beaucoup plus rares, mais ont des vitesses de chute élevées, et assurent ainsi l'essentiel du transport de matière vers le fond (voir Simpson, 1982).

Suivant le mode de collection des particules, on récolte préférentiellement l'une ou l'autre classe de particules : la filtration d'eau de mer prélevée à la bouteille favorise la récolte de petites particules, et permet d'accéder à la masse de suspension par unité de volume d'eau de mer ; les pièges à sédiments, qui conduisent à la détermination d'un flux, récoltent une plus forte proportion de grosses particules.

Nous présentons ici des analyses des éléments majeurs des particules marines échantillonnées des deux manières en Méditerranée occidentale. Quatre prélèvements ont été faits à l'aide d'un piège à sédiments, et plus de 500 échantillons recueillis par filtration d'eau de mer ont été récoltés dans l'ensemble du bassin Algéro-Provençal à toutes profondeurs (fig. 1).

MODES DE PRÉLÈVEMENT ET ANALYSES

Prélèvements à la bouteille

L'eau de mer a été recueillie à l'aide de bouteilles Niskin de 6 ou 30 l, dont la totalité du contenu était filtrée, soit sur filtre Whatman GF/C, pour la détermination de la masse de particules, du carbone et de l'azote organique, soit sur filtre Millipore $0,8 \mu\text{m}$, ou Nuclepore $0,6 \mu\text{m}$ pour la détermination des éléments inorganiques : Al, Fe, Si, Mg, Ca, P. Les méthodes de

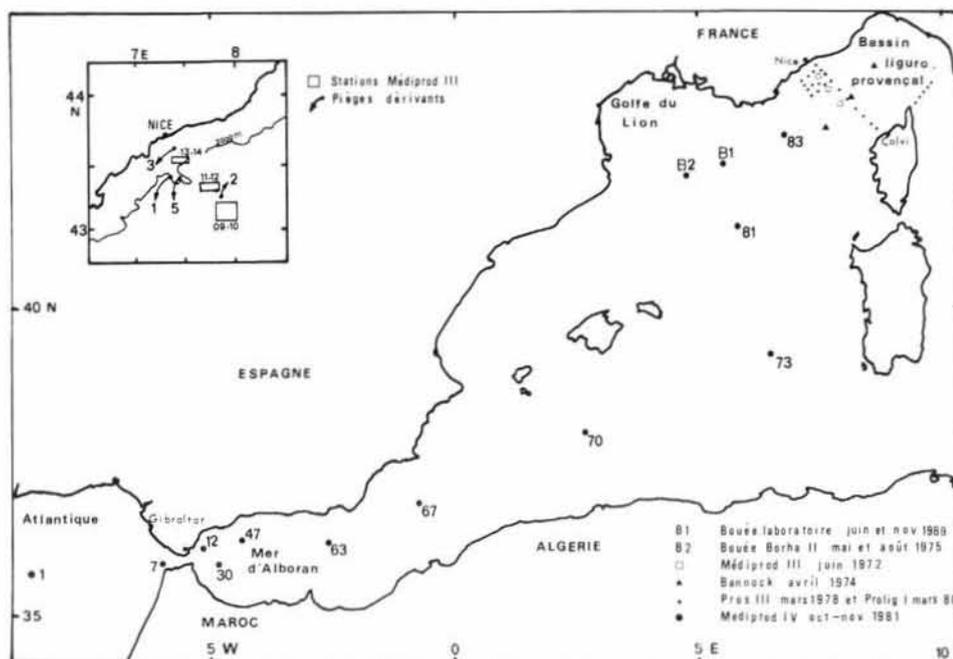


Figure 1
Position des prélèvements de matériel en suspension dans l'eau de mer.
Sampling positions of material suspended in sea water.

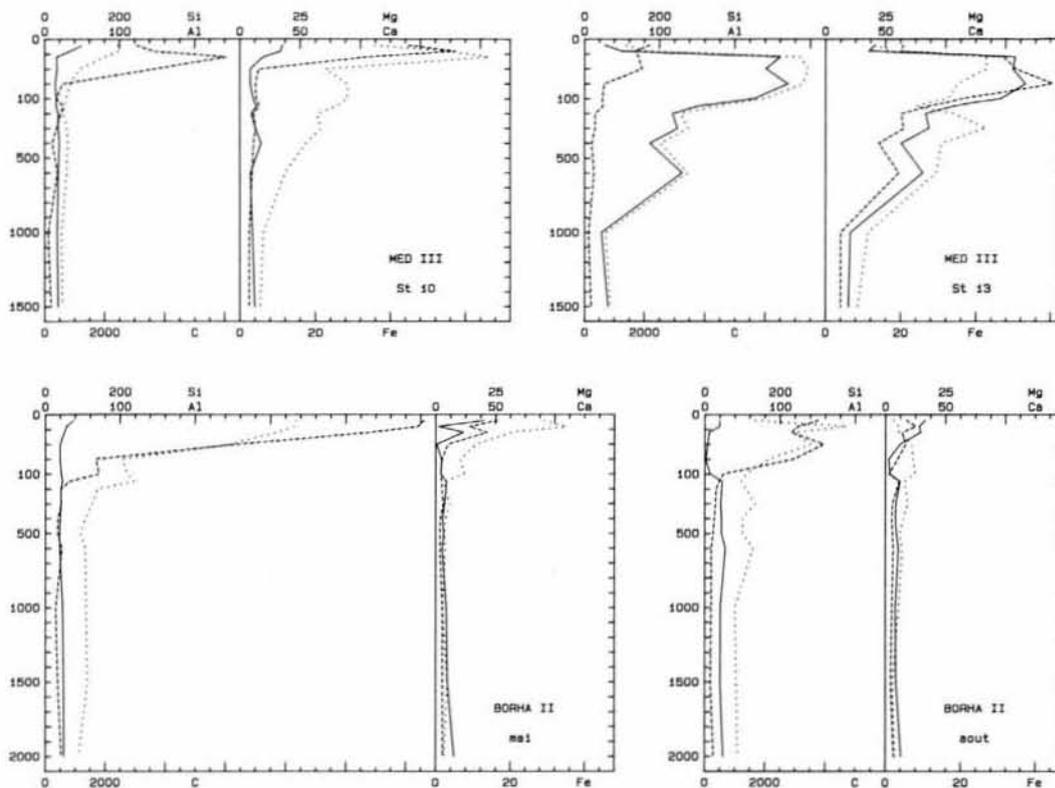


Figure 2

Exemples de répartition verticale des éléments particulaires en Méditerranée occidentale. — Al et Fe, ---- C et Mg, Si et Ca. Les concentrations sont exprimées en $\text{nmole} \cdot \text{l}^{-1}$. Le niveau 1 % de l'éclairement photonique de surface est situé à 50 m à la station 10 et à 70 m à la station 13 de la campagne Médiproduct III, alors que les valeurs de production primaire intégrée sont respectivement de 332 et 118 $\text{mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ (Groupe Médiproduct, 1974).

Examples of the vertical distribution of particulate elements in the Western Mediterranean Sea. Concentrations are in $\text{nmole} \cdot \text{l}^{-1}$. The 1% light depth is located at 50 m at station 10 and at 70 m at station 13 of the Mediproduct III cruise. The integrated water column production values are respectively 332 and 118 $\text{mg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ for the same stations.

prélèvement et d'analyse ont déjà été décrites (Copin-Montégut, Copin-Montégut, 1978 ; 1983). L'ensemble des résultats des analyses a été publié par Copin-Montégut (1974), Copin-Montégut (1980) et Copin-Montégut et Nicolas (1984).

Prélèvements au piège à sédiment

Les prélèvements ont été faits à l'aide d'un piège à sédiment dérivant de 1 m^2 de section, placé à 200 m de profondeur pendant 35 à 48 heures. Les matières recueillies ont été lyophilisées, le carbone et l'azote organiques, l'aluminium, le fer, le silicium et le phosphore ont été dosés sur des aliquots du lyophilisat.

RÉPARTITION SPATIALE DES ÉLÉMENTS PARTICULAIRES

Des variations dans l'allure générale des profils verticaux des éléments particulaires apparaissent en fonction de la position géographique des stations de prélèvement et en fonction de la saison. Pour les éléments terrigènes tels que l'aluminium, les concentrations sont nettement différentes dans les zones

côtières et dans la zone du large. Pour les éléments biogènes, on observe des variations saisonnières, surtout dans la zone euphotique, ainsi que des variations géographiques. Des exemples de profils types sont donnés par la figure 2. En Mer d'Alboran et dans le détroit de Gibraltar, les profils sont nettement différents et seront discutés séparément.

Matières organiques particulaires

Nous ne présentons ici que les résultats concernant la répartition verticale du carbone organique (COP), utiles pour comprendre la répartition des éléments minéraux biogènes. La composition des matières organiques particulaires en carbone, azote et phosphore a déjà été discutée en détail (Copin-Montégut, Copin-Montégut, 1983).

La répartition verticale du COP est caractéristique des zones tempérées à tendance oligotrophe : on observe de fortes variations de concentration dans la zone superficielle 0-100 m, en fonction de la profondeur, du lieu et de la saison. Ces variations sont dues aux influences combinées de la production biologique et de la structure physique : lorsque les conditions de température et d'éclairement sont favorables à une production planctonique, il y a une création de particules biogènes d'autant plus importante que la

pycnocline est peu marquée ($\sigma_\theta = 28,90$ à 10 m, $\sigma_\theta = 29,03$ à 100 m à Borha II, mai, fig. 2), ou bien située à faible profondeur (entre 10 et 20 m à la station 10, Med III, fig. 2). Les sels nutritifs peuvent alors diffuser depuis les eaux sous-jacentes vers la plus grande partie de la couche éclairée, et être disponibles pour la production primaire.

Sous la couche euphotique, les concentrations en COP deviennent faibles, peu variables dans le temps et l'espace, et diminuent en moyenne légèrement avec la profondeur. Les observations faites à la bouée-laboratoire Borha II en mai et août 1975 montrent l'existence de petites variations saisonnières à toutes profondeurs. Les moyennes de trois mesures effectuées à chaque période sont systématiquement plus faibles à profondeurs égales en août qu'en mai, et sont significativement différentes (d'après un test de comparaison des moyennes valable pour un faible nombre de mesures, Commissariat à l'Énergie Atomique, 1978). La colonne d'eau comprise entre 100 et 2 000 m contient $0,55 \text{ mole C m}^{-2}$ en mai, et $0,37 \text{ mole C m}^{-2}$ en août, alors qu'entre 0 et 100 m, il y a $0,66 \text{ mole C m}^{-2}$ en mai, et $0,31 \text{ mole C m}^{-2}$ en août. Ces variations saisonnières impliquent un transport rapide et important des particules organiques vers le fond en période de production intense, soit par l'intermédiaire du zooplancton et des pelotes fécales, soit par mouvements verticaux des masses d'eau, la stratification verticale étant très faible au mois de mai ($\sigma_\theta = 29,03$ à 100 m ; $\sigma_\theta = 29,10$ à 1 000 m).

L'aluminium

Parmi les éléments majeurs des matières en suspension, l'aluminium (Al_p) est l'élément le plus représentatif des matières terrigènes. Lorsqu'il est inclus dans les matières biogènes marines, c'est le plus souvent sous forme de particules d'aluminosilicates adsorbées (voir Collier, Edmond, 1984). L'origine continentale de l'aluminium particulaire est mise en évidence par la répartition de cet élément, selon une radiale perpendiculaire à la côte, au large de Nice (fig. 3). L'expansion vers le large de particules terrigènes est limitée par la

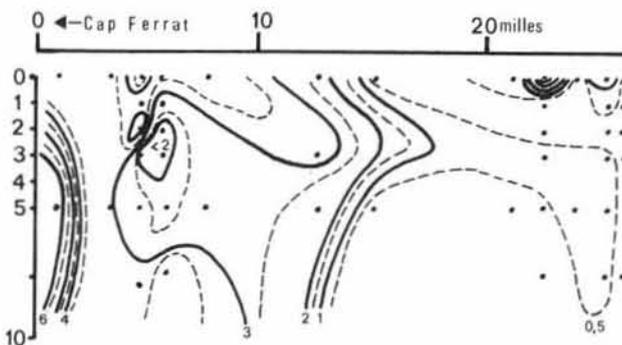


Figure 3
Répartition verticale de l'aluminium particulaire selon la radiale Le Cap Ferrat-Calvi. Les concentrations sont exprimées en $\mu\text{mole} \cdot \text{l}^{-1}$.

Distribution of particulate aluminium along a vertical section of the radial Cap Ferrat-Calvi. Concentrations are in $\mu\text{mole} \cdot \text{l}^{-1}$.

présence du front hydrologique qui suit approximativement l'isobathe 2 000 m, et sépare les eaux côtières des eaux du large (Prieur *et al.*, 1981). Au-delà de ce front, Al_p est très peu variable. La teneur moyenne pour l'ensemble du bassin algéro-provençal est $\text{Al}_p = 22 \text{ nmole/l}$, avec un écart type de 9 nmole/l pour 216 échantillons. Elle est en accord avec les mesures indirectes (basées sur le rapport Sc/Al dans les argiles) effectuées par Risler (1984) en quatre stations du bassin algéro-provençal. D'après cet auteur, Al_p dans les eaux du large pourrait être d'origine atmosphérique.

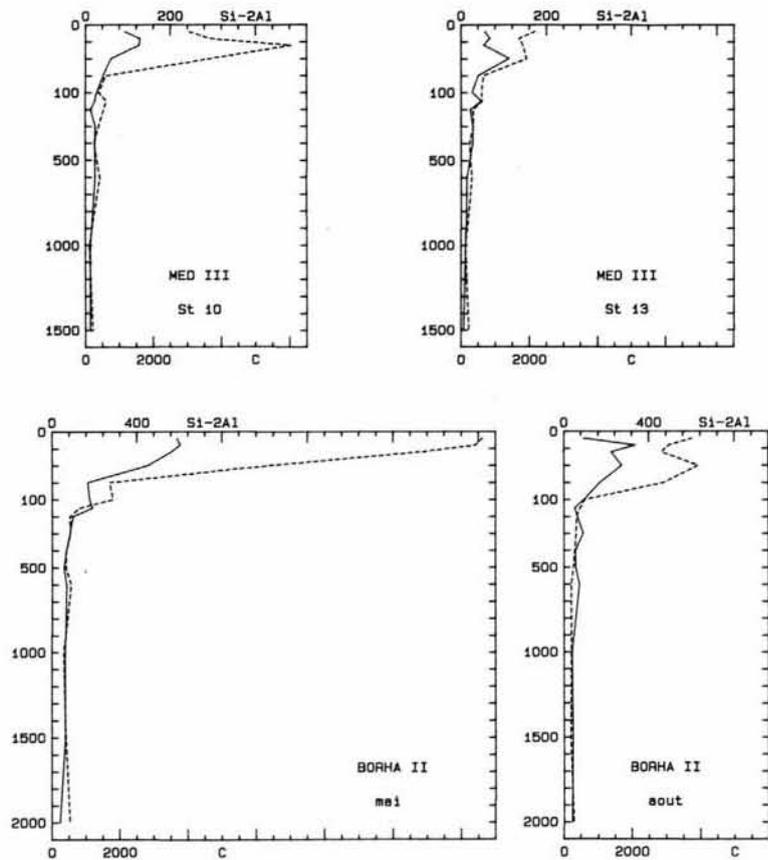
Une observation plus fine des profils verticaux montre une diminution fréquente de Al_p dans la zone superficielle, et une légère augmentation vers 500 m. Wallace *et al.* (1981) ont relevé la même diminution de Al_p dans la zone superficielle et l'ont attribuée à l'ingestion des particules minérales par des organismes filtreurs, en particulier les salpes. L'augmentation de Al_p vers 400-500 m pourrait être due au transport de matière terrigène par les eaux intermédiaires, mais aucun lien entre l'importance de ce maximum, et le pourcentage d'eau intermédiaire n'a pu être établi. Risler (1984) explique cette augmentation qu'il a également observée, par la désagrégation des pelotes fécales vers ces profondeurs qui remettrait en suspension de petites particules. Mais nous n'avons jamais relevé d'augmentation concomitante de COP.

Le silicium

Le silicium particulaire (Si_p) peut être, soit d'origine continentale (aluminosilicates, quartz), soit d'origine biologique (sous forme d'opale qui constitue les parties dures de certains organismes planctoniques, diatomées, silicoflagellées, radiolaires, *etc.*). Lorsque le pourcentage de matière terrigène dans les particules est important, la distribution de Si_p est similaire à celle de Al_p . Ainsi le coefficient de corrélation entre Si_p et Al_p est de 0,97 en zone côtière sur la radiale Nice-Calvi (stations 13 et 14 de la campagne Médipro III). Par contre, quand le pourcentage de matière terrigène devient faible, le profil vertical de Si_p se rapproche de celui de COP (coefficient de corrélation entre COP et Si_p à la bouée Borha II = 0,96 pour 41 échantillons). Le rapport Si_p/Al_p est toujours supérieur à 2 dans les particules de Méditerranée, et se rapproche de 2 quand Al_p/COP augmente. Pour tenter d'évaluer la fraction biogène Si_{bio} de Si_p , nous avons supposé que le rapport Si/Al dans les particules terrigènes était constant dans l'ensemble du bassin, et égal à 2. La figure 4 permet de comparer les profils de $\text{Si}_{\text{bio}} = \text{Si}_p - 2 \text{ Al}_p$ avec ceux de COP. Si_{bio} est plus abondant dans les particules organiques de la zone profonde que dans celles de la zone superficielle : le silicium repasse moins facilement que le carbone organique en solution et est donc moins recyclé. En dessous de la zone euphotique, $\text{Si}_{\text{bio}}/\text{COP}$ est à peu près constant sur une verticale, et de l'ordre de 0,08 dans le bassin liguro-provençal et de 0,16 à la bouée Borha II, où la production très intense au mois de mai, est probablement plus riche en diatomées.

Figure 4

Profils verticaux du silicium biogène, comparés à ceux du carbone organique particulaire. — Si-2 Al, - - - C. Les concentrations sont exprimées en $\text{nmole} \cdot \text{l}^{-1}$.
Vertical profiles of biogenic silicon (Si-2 Al) compared with those of particulate organic carbon. Concentrations are in $\text{nmole} \cdot \text{l}^{-1}$.



Le fer et le magnésium

Comme le silicium, le fer et le magnésium peuvent être terrigènes ou biogènes. Des calculs de corrélation effectués en séparant zone superficielle et zone profonde (≥ 100 m), et en regroupant les stations par régions, montrent que le fer est généralement très bien corrélé avec l'aluminium, ce qui indique qu'il est surtout inclus dans les argiles. Quand le pourcentage de matières terrigènes dans les particules est important, Fe_p/Al_p tend vers 0,20. Les mesures de Risler (1984) donnent un résultat très voisin ($\text{Fe}_p/\text{Al}_p = 0,22$) pour les particules remises en suspension près du fond en Méditerranée occidentale. Ce rapport est inférieur à Fe/Al dans la croûte terrestre, égal à 0,30 d'après Mason (1966). Dans la zone superficielle, Fe_p/Al_p est généralement plus grand, ce qui montre qu'une partie du fer est biogène. Lorsqu'il y a une forte concentration en COP (Borha II, mai 1975, stations du large de Prolog I), un calcul de régression de Fe_p avec COP et Al_p indique que $\text{Fe}_{\text{bio}}/\text{COP}$ est de l'ordre de 10^{-3} . Quand COP est plus faible, la proportion de Fe_{bio} est trop petite pour pouvoir être évaluée.

Comme le fer, le magnésium est essentiellement lié à l'aluminium, mais le rapport Mg/Al dans les matières terrigènes n'est pas constant dans l'ensemble de la Méditerranée occidentale. Il est voisin de 0,26 dans le bassin liguro-provençal et de 0,18 à la bouée Borha II (Mg n'a pas été déterminé dans les échantillons de la campagne Médiproduct IV). Le magnésium biogène n'est présent en proportion importante que dans la

zone superficielle où son rapport à COP est de l'ordre de 10^{-3} .

Le calcium

La répartition verticale du calcium est différente de celle de tous les autres éléments particuliers dosés. Une corrélation assez bonne de Ca_p avec Al_p pour les échantillons côtiers ($r = 0,80$ pour 26 échantillons) montre de toute évidence qu'une fraction du calcium est terrigène, mais le rapport Ca/Al dans les matières terrigènes ne semble pas constant sur le bassin et dans le temps : ainsi, dans une même zone, la région côtière du bassin liguro-provençal, il varie d'une campagne à une autre (Médiproduct III, Prolog I et Prolog III). L'écart des valeurs de Ca_p entre les stations du large et les stations côtières est moins grand que pour Si, Fe ou Mg. De toute évidence, comme l'indique une certaine similitude des profils de Ca_p et de COP dans les eaux du large, une fraction importante de Ca_p est biogène, mais elle ne peut être évaluée, d'une part, parce que Ca/Al n'est pas constant dans les matières terrigènes, d'autre part parce que la cinétique de dissolution de Ca_{bio} est différente de celle de COP ; ainsi Ca/COP augmente jusqu'à 400 m, puis diminue, dans le bassin liguro-provençal. Dans ce bassin Ca_p est plus abondant que Si_{bio} dans les eaux profondes, alors que la situation est inversée dans le golfe du Lion (Borha II), où Ca_p est environ 5 fois moins abondant, et Si_{bio} 2 à 3 fois plus.

Répartition des particules dans le détroit de Gibraltar, et en Mer d'Alboran

Des concentrations en éléments particulaires nettement plus élevées que dans l'ensemble du bassin algéro-provençal ont été relevées pendant la campagne Médiprod IV, dans la Mer d'Alboran.

En une station atlantique située à l'ouest du détroit de Gibraltar (station 1), les teneurs en particules minérales et organiques sont voisines de celles que l'on peut mesurer à une station du large de la Méditerranée occidentale à profondeur équivalente. Immédiatement à l'ouest du détroit de Gibraltar (station 7), les teneurs dans la zone superficielle sont encore voisines de celles classiquement observées pour des stations du large, alors que près du fond (c'est-à-dire à 370 m, le fond étant à 415-445 m), Al_p , Fe_p sont multipliés environ par 4 et Si/Al est voisin de 4. Cette augmentation de la teneur en particule peut être attribuée à la remise en suspension de sédiments, favorisée par le passage d'un fort courant d'eau dans le détroit de Gibraltar, dirigé d'est en ouest près du fond. Le rapport Si/Al important pourrait indiquer une forte proportion de matières d'origine biologique dans ces suspensions.

A l'est du détroit de Gibraltar (station 12), la situation est inversée. La concentration en matières organiques et minérales est importante dans la zone superficielle, alors qu'entre 300 et 700 m elle est voisine de celle observée à ces profondeurs en Méditerranée. La forte concentration en COP dans la zone superficielle s'explique par la richesse des eaux de surface en sels nutritifs, due à une remontée des eaux profondes près des côtes d'Espagne, ce qui entraîne une forte production. Des concentrations en chlorophylle atteignant $3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ont été mesurées au nord de la station 12 (Minas *et al.*, 1983). Les concentrations en Si_p dans la zone superficielle sont les plus fortes que nous ayons relevées en Méditerranée. Si on suppose que dans les matières terrigènes $Si/Al = 2$, comme dans le bassin algéro-provençal, $Si_{\text{bio}}/COP = 0,20$, alors que ce même rapport est généralement compris entre 0,03 et 0,06 dans les eaux de la couche euphotique du bassin. Ce rapport élevé peut être attribué à une forte production de diatomées que l'on observe générale-

ment dans les zones de remontée d'eau profonde (Raymont, 1980).

Les fortes concentrations en Al_p dans la zone superficielle (8 à 10 fois les teneurs moyennes de la Méditerranée occidentale), peuvent provenir de l'érosion côtière au cours du passage des eaux atlantiques dans le détroit de Gibraltar. Les faibles concentrations en dessous de la zone euphotique indiquent que les matières terrigènes ne sédimentent pas verticalement. Elles sont entraînées dans le mouvement anticyclonique (Gascard, Richez, 1985) plus à l'est, ce que confirme une plus forte concentration de Al_p en profondeur aux stations 30, 47 et 63 (3 à 4 fois la teneur moyenne de la Méditerranée occidentale).

Flux de particules

Le matériel récolté à l'aide d'un piège à sédiments pendant la campagne Trophos, en mai 1982, a été comparé à celui prélevé par filtration lors de la campagne Médiprod III en juin 1972 dans la même région (tab.). La comparaison ne peut être que très approximative dans la zone côtière où les apports terrigènes sont très variables. Elle est meilleure dans la zone du large où les variations de teneurs en particules sont faibles à 200 m. Les quantités de matière recueillies dans les trois pièges de la zone du large sont du même ordre de grandeur. Seul le carbone est moins abondant dans le piège situé le plus au large. Dans le piège de la zone côtière, la teneur en carbone est toujours du même ordre de grandeur que dans les pièges précédents, mais la quantité de silice biogène (obtenue en supposant que $Si/Al = 2$ dans les matières terrigènes) est doublée par rapport au large, et celle d'aluminium est multipliée par 8.

Dans les matières en suspension récoltées à la même profondeur, Si_{bio} est également doublé entre le large et la côte, alors que COP reste du même ordre de grandeur. Al_p , bien que variable dans la zone côtière, est approximativement multiplié par 8 comme dans les pièges à sédiments. Il apparaît donc que les rapports de concentrations de ces différents éléments entre le large et la côte sont les mêmes dans les matières recueillies au piège, et dans celles recueillies par filtration.

Tableau

Flux de matières recueillies avec un piège à sédiment pendant la campagne Trophos (mai 1982), et concentrations de particules mesurées à des stations voisines pendant la campagne Médiprod III (juin 1972).

Flux of material collected with a sediment trap during the Trophos cruise (May 1982), and particle concentrations at neighbouring stations during the Mediprod III cruise (June 1972).

		C	Al	Si_{bio}	
LARGE	Flux ($\text{mmole} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$)				
		piège 2	3,64	0,17	1,48
		piège 5	7,13	0,21	2,04
		piège 1	7,18	0,18	1,82
	Concentration ($\mu\text{mole} \cdot \text{m}^{-3}$)	stations 11-12	330	18,5	15,0
	Vitesse de descente ($\text{m} \cdot \text{jour}^{-1}$)	piège 2/stations 11-12	11	9	100
CÔTE	Flux ($\text{mmole} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$)				
		piège 3	5,83	1,54	4,83
		stations 13-14	380	140	33
	Vitesse de descente ($\text{m} \cdot \text{jour}^{-1}$)		15	11	145

Les particules prélevées au piège sont plus riches en Si_{bio} que les particules en suspension, alors que le rapport Al/C est à peu près le même. Ces résultats montrent que les particules contenant de l'opale d'origine biologique sédimentent plus vite que les matières organiques, ce qui paraît logique, l'opale étant beaucoup plus dense par rapport à l'eau de mer que les matières carbonées. Des vitesses de chute similaires pour le carbone et l'aluminium peuvent indiquer que les particules d'aluminosilicates sont associées aux matières organiques (par suite de phénomènes d'adsorption ou bien de l'ingestion par des organismes filtreurs de particules d'argile qui sont ensuite rejetées dans les pelotes fécales), mais la conjugaison d'une plus petite taille et d'une plus grande densité peut aussi amener à la même vitesse de chute. De toute manière, les vitesses de chute que nous avons calculées ne doivent être considérées que pour leur ordre de grandeur du fait de problèmes inhérents à l'emploi de pièges à sédiments (représentativité du flux de matière récoltée en quantité et en composition) et du fait de la non-simultanéité des mesures sur la masse et le flux de particules. Néanmoins, la vitesse de sédimentation du carbone organique tombe dans la fourchette de 2 à 8 km · an⁻¹ à 100 m (soit 5,5 à 22 m · j⁻¹) donnée par Watson et Whitfield (1985). Par ailleurs, si on suppose que le flux d'aluminium est le même à 200 m que près du fond, on peut estimer l'épaisseur de sédiment formé à partir du dépôt de suspensions argileuses à 2,7 cm/1 000 ans en prenant une masse volumique des sédiments superficiels de 0,75 g · cm⁻³ (Chester, 1982), et un rapport masse d'argile/masse d'aluminium égal à 10 (Sackett, Arrhenius, 1962). Ceci s'accorde avec les taux de sédimentation mesurés en Méditerranée (2 à 10 cm/1 000 ans, Michard *et al.*, 1974 ; Vergnaud-Grazzini, 1975).

CONCLUSION

La composition chimique des particules en suspension en Méditerranée occidentale est peu différente de celle des particules océaniques. Bien que la teneur en

matière terrigène soit 3 à 4 fois plus importante dans les eaux du large qu'en diverses régions de l'Atlantique (voir Copin-Montégut, 1974 ; Copin-Montégut, 1980 ; Lambert *et al.*, 1984), environ 90 % en masse des particules des eaux superficielles et 70 % des particules de la zone subeuphotique sont biogènes. Les teneurs en particules sont donc très liées à la production primaire, en dehors de forts apports côtiers.

L'enrichissement des particules profondes en matières terrigènes est dû à la dégradation des particules organiques, qui se fait immédiatement au bas de la couche euphotique pour les petites particules. Si on se réfère aux mesures de productivité primaire effectuées sur la radiale Nice-Calvi par Rodriguez-Prada (1973), le flux de carbone organique à 200 m représente 14 % du carbone fixé par photosynthèse aussi bien au large que près de la côte. 86 % de la production est donc recyclé dans les 200 premiers mètres. Les régions de forte teneur en COP sont aussi celles où le rapport Si_{bio}/COP est le plus grand dans la zone euphotique (Mer d'Alboran, Borha II en mai). La production de diatomées demande des apports importants de silicates dissous, le silicium sous forme d'opale étant recyclé moins vite et à plus grande profondeur que les autres éléments nutritifs. Cependant, la concentration en silicate dissous ne semble pas le seul facteur limitant la production de plancton siliceux. En effet, le silicium dissous est utilisé de façon plus efficace en Mer d'Alboran que dans le nord du bassin méditerranéen occidental : dans cette dernière région, la concentration en silicium biogène particulaire dans la zone euphotique est au plus égale à 17 % de celle en silicium dissous à profondeur égale. Par contre en Mer d'Alboran les concentrations en silicium biogène particulaire dépassent celles en silicium dissous (voir les données en silicium dissous dans Groupe Médiprod, 1974 ; 1984 ; Copin-Montégut, 1980).

Le calcium a un comportement particulier. Sa concentration dans les particules, très variable, est généralement peu corrélée à celle des autres éléments majeurs des suspensions. Elle est plus faible lorsque les particules sont riches en silice biogène.

RÉFÉRENCES

- Chester R., 1982. Regional trends in the distribution and sources of aluminosilicates and trace metals in recent north Atlantic deep-sea sediments, *Actes Colloq. Inter. CNRS, Bordeaux, septembre 1981, Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine, Bordeaux*, **31**, 325-335.
- Collier R., Edmond J., 1984. The trace element geochemistry of marine biogenic particulate matter, *Progr. Oceanogr.*, **13**, 113-199.
- Commissariat à l'Énergie Atomique, 1978. *Statistique appliquée à l'exploitation des mesures. Tome II*, Masson, Paris, 412 p.
- Copin-Montégut C., 1974. Contribution à l'étude chimique des particules en suspension dans l'eau de mer, *Thèse Doct. État, Univ. Paris VI*, 150 p.
- Copin-Montégut C., Copin-Montégut G., 1978. The chemistry of particulate matter from the south Indian and Antarctic oceans, *Deep-Sea Res.*, **25**, 911-931.
- Copin-Montégut C., Copin-Montégut G., 1983. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in marine particulate matter, *Deep-Sea Res.*, **30**, 31-46.
- Copin-Montégut G., 1980. Matières en suspension dans les eaux de mer : répartition, composition chimique, origine et évolution, *Thèse Doct. État, Univ. Paris VI*, 173 p.
- Copin-Montégut G., Nicolas E., 1984. Particules en suspension dans l'eau de mer, in : Propriétés hydrologiques et chimiques des eaux du bassin occidental de la Méditerranée. Campagne Médiprod IV (15 octobre-17 novembre 1981), *Publ. CNEXO, sér. Résultats des campagnes à la mer*, **26**, 97-98.
- Gascard J.-C., Richez C., 1985. Water masses and circulation in the western Alboran sea, and in the straits of Gibraltar, *Progr. Oceanogr.*, **13**, 157-216.

- Groupe Médiprod**, 1974. Résultats de la campagne Médiprod III (13 juin-2 juillet 1972), *Publ. CNEOXO, sér. Résultats des campagnes à la mer*, **8**, 40 p.
- Groupe Médiprod**, 1984. Propriétés hydrologiques et chimiques des eaux du bassin occidental de la Méditerranée. Campagne Médiprod IV (15 octobre-17 novembre 1981), *Publ. CNEOXO, sér. Résultats des campagnes à la mer*, **26**, 106 p.
- Lambert C. E., Bishop J. K. B., Biscaye P. E., Chesselet R.**, 1984. Particulate aluminium, iron and manganese chemistry at the deep Atlantic boundary layer, *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **70**, 237-248.
- Mason B.**, 1966. *Principles of geochemistry*, J. Wiley and sons, Inc., New York, 330 p.
- Michard G., Church T. M., Bernat M.**, 1974. The pore water chemistry of recent sediments in the western Mediterranean basin, *J. Geophys. Res.*, **79**, 817-824.
- Minas H. J., Coste B., Gascard J. C., Le Corre P., Richez C.**, 1983. Propriétés chimiques et circulation des masses d'eau dans le détroit de Gibraltar et en Mer d'Alboran (campagne Médiprod IV du N.O. J. Charcot, octobre-novembre 1981), *Rapp. Comm. Inter. Mer Médit.*, **28**, 2, 129-130.
- Prieur L., Béthoux J.-P., Albuisson M., Wald L., Monget J.-M.**, 1981. A comparison between infrared satellite images and sea truth measurements, in: *Oceanography from space*, édité par J. F. R. Gower, Plenum Publ. Corp., 159-167.
- Raymont J. E.**, 1980. *Plankton and productivity in the oceans. Vol. 1, Phytoplankton*, Pergamon Press, 490 p.
- Risler N.**, 1984. Les aluminosilicates et les terres rares dans les particules marines en Méditerranée occidentale, *Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII*, 138 p.
- Rodriguez-Prada F.**, 1973. Contribution à l'étude de la production primaire du bassin liguro-provençal, *Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VI*, 110 p.
- Sackett W. M., Arrhenius G. O. S.**, 1962. Distribution of aluminum species in the hydrosphere. I: Aluminum in the ocean, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **26**, 955-968.
- Simpson W. R.**, 1982. Particulate matter in the oceans. Sampling methods, concentration, size distribution and particle dynamics, *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **20**, 119-172.
- Vergnaud-Grazzini C.**, 1975. ¹⁸O changes in foraminifera-carbonates during the last 100 000 years in the Mediterranean Sea, *Science*, **190**, 272-274.
- Wallace G. T. Jr., Mahoney O. M., Dulmage R., Storti F., Dudek N.**, 1981. First-order removal of particulate aluminium in oceanic surface layers, *Nature*, **293**, 729-731.
- Watson A. J., Whitfield M.**, 1985. Composition of particles in the global ocean, *Deep-Sea Res.*, **32**, 1023-1039.