

Le néphéloïde benthique,au large du Rhône. Transferts particulaires,à l'interface continent-océan

J.J. Naudin, Gustave Cauwet, Leveau, Michel, Paul, H, J.-C. Romano, Lochet, François, Richard Sempere

▶ **To cite this version:**

J.J. Naudin, Gustave Cauwet, Leveau, Michel, Paul, H, J.-C. Romano, et al.. Le néphéloïde benthique,au large du Rhône. Transferts particulaires,à l'interface continent-océan. Oceanologica Acta, 1992, 15 (6), pp.621-638. hal-02053055

HAL Id: hal-02053055
https://amu.hal.science/hal-02053055

Submitted on 28 Feb 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Le néphéloïde benthique au large du Rhône. Transferts particulaires à l'interface continent-océan

Néphéloïde benthique
Matériel particulaire en suspension
Courantométrie
Hydrologie

Bottom nepheloid layer
Particulate matter
Current measurements
Hydrology

Jean-Jacques NAUDIN [a], Gustave CAUWET [a], Michel LEVEAU [b], François LOCHET [b], Henri PAUC [a], Jean-Claude ROMANO [b], Richard SEMPERE [a]

[a] Laboratoire de Sédimentologie et Géochimie Marines, URA CNRS n°715, 52, avenue de Villeneuve, 66860 Perpignan Cedex, France.

[b] Centre d'Océanologie de Marseille, URA CNRS n°41, Faculté des Sciences de Luminy, case 901, 70, route Léon Lachamp. 13288 Marseille Cedex 9, France.

Reçu le 10/03/92, révisé le 7/09/92, accepté le 17/10/92.

RÉSUMÉ

Le matériel particulaire du néphéloïde benthique, situé au large de l'embouchure du Rhône, a été prélevé à partir d'un SYstème de Mesures et de Prélèvements HYdrologiques (SYMPHY) permettant d'échantillonner le gradient de concentration des suspensions à proximité du fond. Les mesures courantométriques, hydrologiques, néphélométriques et l'analyse du matériel particulaire mettent en évidence différentes étapes de dispersion du matériel rhodanien sur le plateau continental et permettent de détailler les mécanismes qui contrôlent l'évolution des suspensions au cours de leur transfert dans une mer sans marée importante. Le néphéloïde benthique, défini par un gradient vertical de concentration, résulte de l'équilibre entre les composantes horizontales (apports rhodaniens) et verticales (panache de surface) du flux de particules. La variabilité de cet équilibre, contrôlée par les fluctuations dynamiques, induit des temps de résidence plus ou moins longs, permettant la modification de la nature du matériel particulaire par des processus biogéochimiques

Oceanologica Acta, 1992. **15**, 6, 621-638.

ABSTRACT

The bottom nepheloid layer off the Rhône river mouth. Particulate transfer at the land-ocean interaction

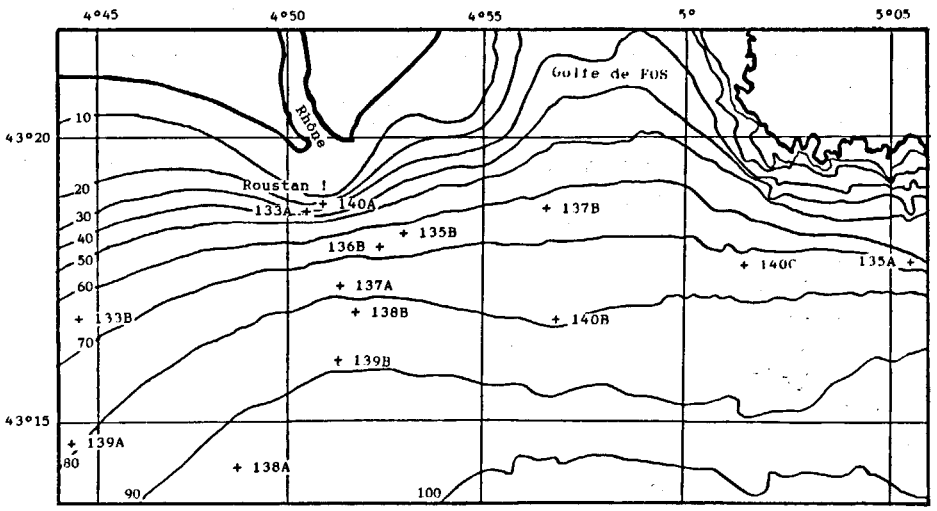
Particulate matter from the bottom nepheloid layer, off the Rhône river mouth was sampled with a newly-designed frame code-named SYMPHY. Several spreading phases of the Rhodanian suspensions on the continental shelf were evidenced by currentmeter records, particulate matter analyses, CTD and nephelometric measurements. These data permitted the study of the mechanisms which control the aging of the suspensions during their transfer to a sea with very small amplitude tides. The bottom nepheloid layer can be defined as a vertical concentration gradient resulting from an equilibrium between the horizontal (Rhodanian inputs) and the vertical (surface nepheloid layer) components of the particulate flux. The variability of this equilibrium, controlled by hydrodynamic fluctuations, involves different residence times and permits modifications of the nature of suspensions by biogeochemical processes.

Oceanologica Acta, 1992. **15**, 6, 621-638.

Figure 1

Localisation des stations de prélèvement.

Location of sampling stations.



INTRODUCTION

Les recherches entreprises sur le néphéloïde benthique du prodelta du Rhône ont permis une étude détaillée des modalités de transfert de la matière en suspension issue de la principale source d'apport fluviatile du plateau continental du golfe du Lion. Les études, pluridisciplinaires, ont porté sur l'analyse des suspensions prélevées, à proximité du fond, par un système de prélèvement adapté dans le cadre de conditions environnementales bien identifiées. Les études antérieures sur le domaine rhodanien ont montré que le transfert des particules, à l'interface continent-océan, s'effectue à partir de deux voies principales : le néphéloïde superficiel et le néphéloïde benthique (Bapst et Beck, 1987). Le panache de surface est, vraisemblablement, la partie la mieux documentée du domaine rhodanien. Le rôle fertilisant joué par ce plume a été clairement démontré (Coste, 1974 ; Leveau et Coste, 1987 ; Lochet et Leveau, 1990 ; Woodward *et al.*, 1990) ainsi que la liaison avec la production primaire (Minas et Minas, 1989 ; Morel *et al.*, 1990 ; Williams et Robinson, 1990). Les études hydrodynamiques en régime impulsionnel (Crépon, 1969) montrent que la nappe superficielle dessalée s'oriente de 45 à 60° sur la droite du vecteur tension de vent en fonction de l'inertie de la nappe de dilution, de celle de l'eau marine sous-jacente et de la durée du vent. Les forçages atmosphériques influencent rapidement la dynamique de la nappe de dilution rhodanienne (Morel *et al.*, 1990), car entre deux passages satellitaires NOAA (6 heures), une variation thermique notable peut être enregistrée (Demarcq et Wald, 1984). Ce forçage agit sur les modalités de transfert particulaire vers le fond ainsi que sur la variabilité de la nature et de la quantité des suspensions superficielles émises par le Rhône (Monaco *et al.*, 1988). En ce qui concerne le néphéloïde benthique, les informations sont beaucoup plus rares, vraisemblablement en raison de la difficulté d'échantillonnage à proximité du fond. Les études récentes ont montré que 90 % du matériel rhodanien sédimente au niveau du prodelta (Martin et Thomas, 1990), et que le néphéloïde de fond constitue une voie de transfert quantitativement aussi importante que le panache superficiel (Calmet et Fernandez, 1990). D'après Aloïsi *et al.* (1982), le néphéloïde benthique rhodanien, qui est en continuité avec le néphéloïde benthique du plateau continental (Monaco *et al.*, 1988), prendrait son origine dès le chenal fluviatile. En effet, dans les estuaires microtidaux, la présence du coin salé provoque la sédimentation des suspensions fluviatiles, à la fois en amont car la réduction de la vitesse d'écoulement entraîne un dépôt par excès de charge (bouchon vaseux), et en aval car le passage à travers le coin salé provoque la floculation électrochimique de la partie la plus réactive des suspensions (Pauc, 1989). Du fait de la concentration plus élevée, les particules qui constituent un néphéloïde peuvent s'agréger à des particules plus grosses, et accélérer la vitesse de transfert vers le sédiment (Mac Cave, 1985). A titre d'exemple et dans le cas d'un néphéloïde océanique de 60 mètres d'épaisseur, les particules peuvent être incorporées dans le sédiment entre 20 et 50 jours après leur intégration dans le néphéloïde (Mac Cave, 1986). Sur le plateau continental, où l'agrégation liée à l'activité biologique est intense et où les néphéloïdes sont beaucoup moins épais, on peut estimer, d'après les vitesses de chute des grosses particules (pelotes fécales, organismes), que ce temps de résidence peut être divisé par 5, voire par 10 (Lande et Wood, 1987). Cependant, les fluctuations hydrodynamiques peuvent perturber rapidement la turbidité dans le néphéloïde de fond (d'Anglejan et Ingram, 1984) et, par conséquent, contribuer à accroître le temps de résidence du matériel en suspension. En milieu marin, l'intensité du courant diminue par friction sur le fond et l'écoulement devient turbulent. Cela entraîne la formation d'une couche homogène, en température et salinité, où l'action de la turbulence est bien délimitée (Richards, 1990). Cette structure est spatialement et temporellement variable (Armi et d'Asaro, 1980), et les fluctuations de turbidité liées à de l'érosion locale sont très peu fréquentes par rapport à celles induites par la variabilité de la quantité de matériel transporté par advection (Gross et Williams, 1991). Ce modèle général de fonctionnement d'un néphéloïde, que l'on rencontre en milieu océanique et sur la plupart des plateaux continentaux, peut présenter des modalités de fonctionnement particulières en raison de l'importance des apports convectifs (panache de surface) et advectifs (suspensions d'origine fluviatile) qui se développent au large du Rhône.

Les objectifs de cette étude du néphéloïde benthique étaient, en premier lieu, de connaître ce domaine qui assure la liaison entre la colonne d'eau et l'interface eau-sédiment. En second lieu, et à partir d'une stratégie d'échantillonnage précise, il s'agissait de suivre l'évolution des suspensions au cours de leur transfert vers le milieu marin. Les résultats obtenus ont permis : d'apporter des informations sur les modalités de transfert des suspensions rhodaniennes en milieu marin ; d'estimer l'impact de ces apports sur le proche plateau continental ; de mieux connaître l'influence des relations entre le néphéloïde de surface et de fond sur le système benthique ; de comparer les modalités de fonctionnement d'un néphéloïde soumis aux apports rhodaniens par rapport à un néphéloïde situé hors de cette influence.

STRATÉGIE D'ÉTUDE ET MATÉRIELS

Stratégie d'échantillonnage

L'étude du néphéloïde benthique a été réalisée à partir de prélèvements situés de part et d'autre de l'embouchure du Rhône. La stratégie d'étude a été basée sur un schéma de dispersion du matériel particulaire rhodanien, vers le Sud-Ouest (Calmet et Fernandez, 1990). Douze prélèvements ont été réussis sur les quatorze stations effectuées (fig. 1). La numérotation des stations correspond au jour julien de leur réalisation, accompagné des lettres A, B ou C suivant leur succession dans la journée. Deux stations, en début (133A) et en fin (140A) de campagne, ont été situées à 22 et 32 m de profondeur, à l'embouchure du fleuve, pour caractériser la variabilité temporelle de la nature des suspensions émises par le Rhône. Deux stations ont été réalisées par 92 et 87 m de profondeur les 18 (138A) et 19 mai (139A), au sud-ouest de l'embouchure, pour l'étude de la partie distale du système. Huit autres stations, intermédiaires, ont été implantées par des fonds de 63 à 79m pour cerner la variabilité spatio-temporelle du néphéloïde. Durant chaque station, le suivi de la variabilité hydrologique a été assuré à partir de profils acquis, en temps réel, par une sonde CTD couplée à un néphélomètre.

Matériels

Le système de prélèvements

Le néphéloïde benthique constitue une interface, à gradient de concentration en particules, où il est délicat de réaliser, à partir d'un navire de surface, des prélèvements de qualité, correctement positionnés par rapport au fond. Un SYstème de Mesures et de Prélèvements HYdrologiques (SYMPHY), constitué d'un bâti métallique lesté et posé sur le fond, a été spécialement mis au point (fig. 2). Il comporte un mât central sur lequel sont fixées trois bouteilles hydrologiques Niskin de 5 litres, à déclenchement simultané et placées en position horizontale afin d'accéder à l'étude des gradients de suspension. Ces bouteilles sont situées à 0.5, 1 et 2 m au-dessus du fond, de même que trois courantomètres Aanderaa, avec capteur de température, qui enregistrent, toutes les 30 secondes, les conditions hydrodynamiques et thermiques antérieures aux prélèvements. L'engin est équipé d'une dérive qui permet son orientation dans le sens du courant au moment de sa pose sur le fond. Afin de s'affranchir de la remise en suspension créée par la pose du bâti, le déclenchement des prélèvements hydrologiques est temporisé et la fermeture des bouteilles s'effectue au minimum 45 minutes après le mouillage. L'engin est relié à une ligne flottante pour sa récupération après le déclenchement des bouteilles, ainsi que pour permettre au navire de surface de réaliser d'autres opérations à la mer durant la station. La manoeuvre de l'engin est aisée (poids total 300 kg), et ne nécessite qu'une grue légère de 3 m de portée. L'utilisation du système est principalement prévue pour le plateau continental.

La sonde multi-paramètres

Il s'agit d'une sonde Züllig HPTC-84 qui, en plus des paramètres conductivité, température et pression, permet la mesure de la néphélométrie. Le diffusiomètre Seatech utilisé mesure la diffusion, par les particules en suspension, d'une source de lumière rouge (635 nm). Cette mesure, qui donne des résultats satisfaisants en domaine profond (Nyffeler et Godet, 1986), semble plus délicate à interpréter en domaine côtier. En effet, la variabilité de la teneur en eau des très nombreuses particules biogènes en suspension introduit une forte hétérogénéité de la réflexivité propre à

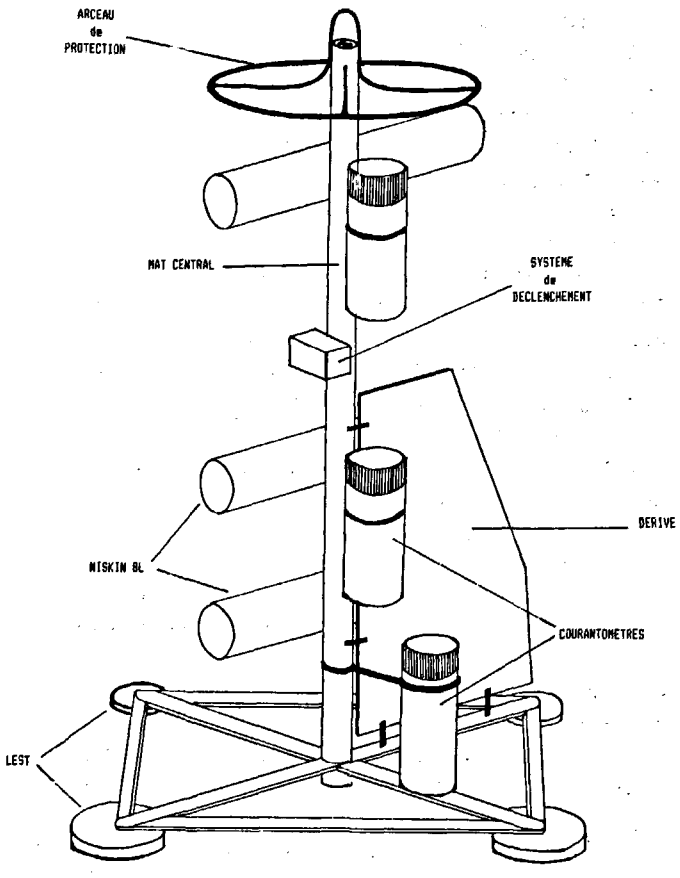


Figure 2

SYMPHY: SYstème de Mesures et de PrélèvementsHYdrologiques.

SYMPHY: frame for hydrological samplings and measurements.

chaque particule. A titre d'exemple, les 36 mesures de charge particulaire réalisées au cours de la mission ont été corrélées aux mesures néphélomètriques correspondantes exprimées, en FTU (Formazin Turbidity Unit), par rapport à une solution standard de Formazine. La relation suivante a été obtenue:

1 FTU ≈ 22 mg/l

mais avec un faible coefficient de corrélation ($R^2 = 0,66$) et un coefficient de variation de 46 % (CV = écart-type x 100 / moyenne). Afin de traduire, au mieux, les variations de la néphélométrie, les valeurs présentées ici seront donc exprimées en FTU.

Le matériel particulaire

Le poids de matériel particulaire en suspension a été déterminé, à partir de la filtration d'un volume d'eau de mer compris entre 300 ml et 5 l selon la charge. Cette opération a été réalisée sur filtres Whatman GF/F (47 mm), sous vide n'excédant pas 150 mm Hg, rinçage à l'eau distillée et séchage en étuve à 40°C. Toutes ces opérations ont été réalisées à bord ou à quai dans un délai maximum de quelques heures. Le carbone organique particulaire a été analysé à partir de filtres Whatman GF/F (47 mm), préalablement passés au four à 450°C. Ces filtres, pliés dans des creusets réfractaires, ont été imprégnés par HCl (2N), pour l'élimination des carbonates, puis séchés à 50°C (Cauwet, 1983). Ensuite, les filtres ont été carbonisés dans un four à induction haute température (1 200°C) et le CO_2 produit analysé par détection infra-rouge (Leco CS 125). La précision de la mesure est de 10 µg C (ou 2 %). Les dosages du carbone total et de l'azote particulaire ont été réalisés grâce à un analyseur Leco 800, selon la méthode mise au point par Kerambrun et Szekielda (1969). La méthode de dosage des

Tableau 1

Concentration en particules (MES), teneurs en carbone total (C), carbone organic particulaire (COP), carbone inorganique particulaire (CIP), azote particulaire (Npar) et pigments totaux (PIG) mesurés dans les suspensions des trois niveaux des douze stations.

Particle concentration (MES), and total carbon (C), particulate organic carbon (COP), particulate inorganic carbon (CIP), particulate nitrogen (Npar), total pigment (PIG) percentages at the three levels of the twelve stations.

N	Niveaux	MES	C %	COP %	CIP %	Npar %	PIG ‰
1	133A 2 m	14,25	8,00	2,32	5,68	0,281	0,016
2	133A 1 m	132,40	4,23	2,34	1,89	0,211	0,004
3	133A 5 m	203,14	3,12	2,40	0,72	0,158	0,004
4	133B 2 m	4,90	7,96	4,08	3,88	0,408	0,007
5	133B 1 m	42,00	7,10	2,12	4,98	0,286	0,002
6	133B 5 m	61,30	6,38	2,07	4,31	0,277	0,001
7	135A 2 m	5,37	8,19	3,91	4,28	0,372	0,019
8	135A 1 m	11,50	8,52	2,61	5,91	0,261	0,010
9	135A 5 m	25,57	7,90	2,19	5,71	0,313	0,004
10	136B 2 m	33,33	7,41	2,10	5,31	0,300	0,004
11	136B 1 m	50,86	6,78	2,06	4,72	0,275	0,005
12	136B 5 m	56,91	6,57	2,07	4,50	0,281	0,005
13	137A 2 m	53,08	6,69	2,07	4,62	0,283	0,002
14	137A 1 m	93,60	5,24	2,14	3,10	0,246	0,001
15	137A 5 m	87,40	5,45	2,12	3,33	0,252	0,001
16	137B 2 m	8,70	8,28	2,88	5,40	0,345	0,013
17	137B 1 m	22,60	7,92	2,30	5,62	0,310	0,005
18	137B 5 m	25,63	7,92	2,15	5,77	0,312	0,005
19	138A 2 m	36,79	7,29	2,04	5,25	0,299	0,001
20	138A 1 m	23,61	8,00	2,24	5,76	0,296	0,003
21	138A 5 m	49,09	6,83	2,00	4,83	0,285	0,001
22	139A 2 m	15,93	7,97	2,26	5,71	0,314	0,009
23	139A 1 m	13,11	8,24	2,52	5,72	0,305	0,010
24	139A 5 m	19,71	8,01	2,28	5,73	0,304	0,010
25	139B 2 m	9,43	8,17	2,76	5,41	0,318	0,007
26	139B 1 m	15,28	7,92	2,16	5,76	0,327	0,007
27	139B 5 m	14,16	7,91	2,26	5,65	0,282	0,007
28	140A 2 m	5,11	8,41	3,91	4,50	0,391	0,031
29	140A 1 m	7,98	7,64	3,13	4,51	0,376	0,019
30	140A 5 m	10,10	8,12	2,77	5,35	0,297	0,019
31	140B 2 m	2,04	9,31	6,37	2,94	0,490	0,014
32	140B 1 m	6,21	7,89	3,86	4,03	0,322	0,006
33	140B 5 m	9,75	8,00	2,77	5,23	0,308	0,005
34	140C 2 m	5,38	8,18	3,90	4,28	0,372	0,008
35	140C 1 m	6,83	8,20	3,51	4,69	0,293	0,006
36	140C 5 m	20,46	7,96	2,39	5,57	0,293	0,002

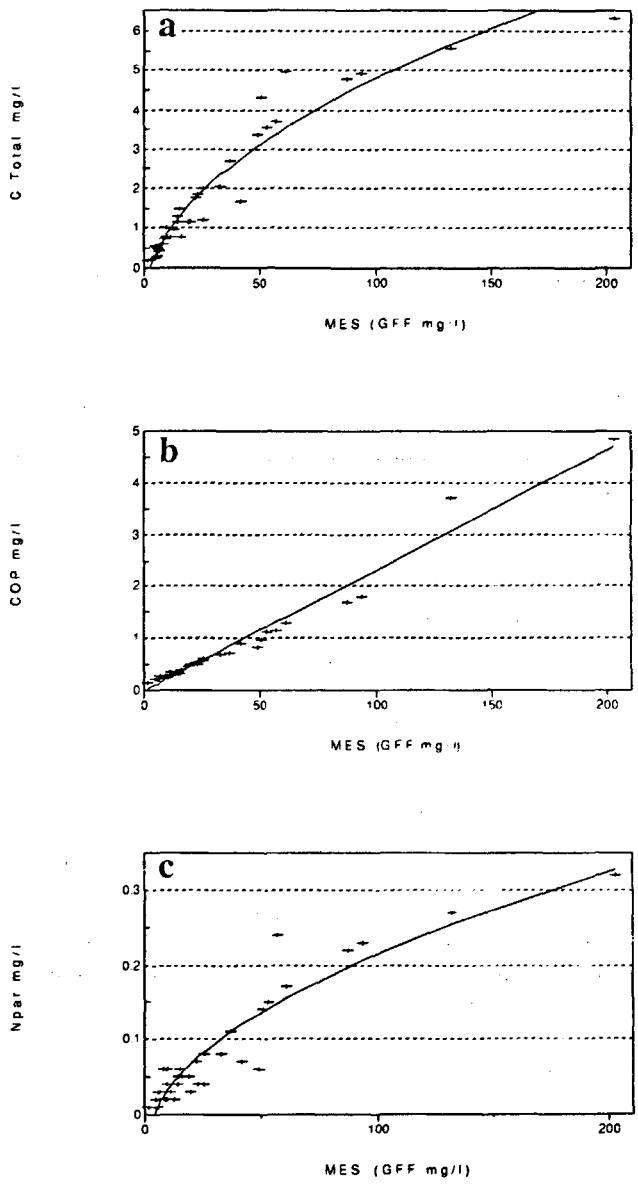


Figure 3

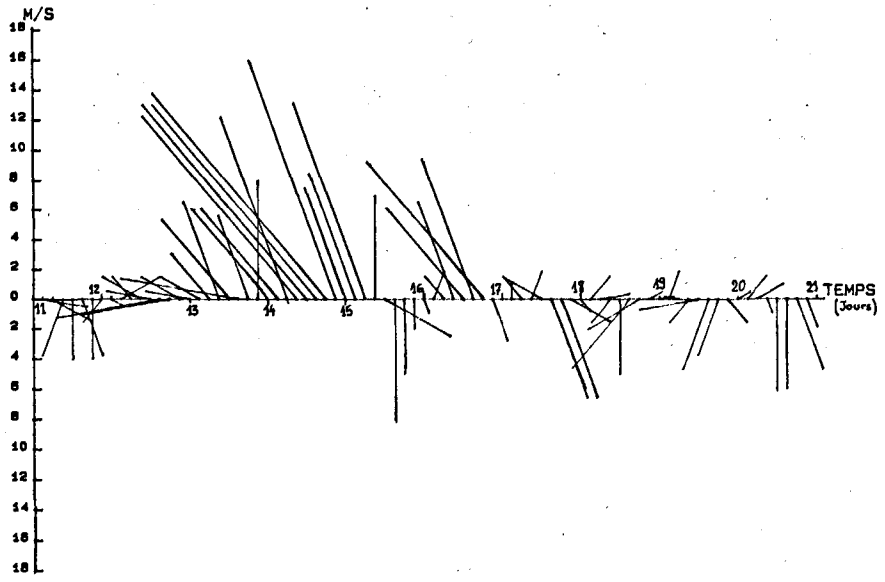
Relations entre charge particulaire (MES) et concentrations en : a) carbone total (C) ; b) carbone organique particulaire (COP) ; c) azote particulaire (Npar).

Relationships between particle concentration (MES) and: a) total carbon (C); b) particulate organic carbon (COP); c) particulate nitrogen (Npar) concentrations.

Figure 4

Vitesse et direction des vents à Istres-le-Tube du 11au 20 mai 1989 (intervalle de mesure : 3 heures).

Wind direction and velocity at Istres-le-Tube from 11 to 20 May (recording interval: 3 hours).



pigments chlorophylliens utilisée est celle décrite par Mantoura et Llewellyn (1983), modifiée par de la Giraudière *et al.* (1989). C'est une méthode de dosage par HPLC après extraction à l'acétone 90 % sur des filtres Whatman GF/F conservés au congélateur (- 18°C) jusqu'au moment de l'analyse. Son intérêt réside dans sa grande sensibilité aux petites quantités de pigments récoltés dans le faible volume d'eau disponible à partir des bouteilles Niskin de 5 l du système de prélèvement. La précision de la mesure est de 0,01 µg de pigment par litre d'eau de mer. Dès la remontée du bâti, des prélèvements ont été réalisés, à bord, pour la mesure de la salinité. Les échantillons ont été stockés dans des canettes de 250 ml, et les mesures ont été effectuées à partir d'un salinomètre à induction Beckman RS-9 (précision de ± 0,001). La charge particulaire (MES) et les concentrations en carbone total (C), carbone organique particulaire (COP), azote particulaire (Npar) et en pigments totaux (PIG) ont été mesurées sur les suspensions de chaque niveau des douze stations (36 échantillons). Les valeurs de C, COP et Npar ont été ajustées par rapport aux courbes de croissance de ces paramètres en fonction de la charge particulaire, afin de s'affranchir des petites variations souvent induites par la mise en oeuvre de différentes techniques de mesure (fig. 3 *a*, 3 *b*, 3 *c*). Pour comparer les valeurs obtenues sur l'ensemble des stations, c'est-à-dire pour comparer des environnements spatio-temporels différents, toutes les concentrations ont été exprimées par rapport à la charge (tab. 1).

RÉSULTATS

Conditions environnementales

Dans le golfe du Lion, la variabilité des caractéristiques hydrologiques et biogéochimiques est contrôlée par : - les forçages atmosphériques, et plus particulièrement les vents de Nord-Ouest ou de Sud-Est, qui perturbent la couche euphotique ou conditionnent l'établissement d'upwellings ; - le débit du Rhône qui, en fonction des états d'étiage ou de crue, influe sur la qualité et la quantité de matière émise vers le plateau continental ; - la circulation liguro-provençale qui, par son rôle de barrière dynamique, contrôle le transfert et le recyclage des suspensions et des matières dissoutes.

Forçages atmosphériques

Dans la zone du delta du Rhône, le régime des vents est principalement de secteur Ouest à Nord-Nord-Ouest (50 %) et de secteur Est à Sud-Est (25 %). Les vents supérieurs à 7,5 $m.s^{-1}$ modifient l'épaisseur de la couche limite superficielle (Deschamps, 1977) et induisent des upwellings, des courants oscillatoires et des ondes internes (Millot et Crépon, 1981 ; Heaps et Jones, 1985). Ces perturbations modifient le régime de circulation dans la zone euphotique, influencent la turbulence près du fond (Grant et Madsen, 1986) et introduisent une variabilité importante dans les caractéristiques hydrologiques. Durant la campagne, les conditions météorologiques ont été marquées par des vitesses du vent inférieures à 7,5 $m.s^{-1}$ (fig. 4). Un seul coup de vent de Nord-Ouest a eut lieu le 14 mai (maximum à 23 $m.s^{-1}$), ce qui n'a pas permis la réalisation de station le jour 134.

Débit rhodanien

Le régime hydraulique du Rhône peut varier de 5.10^2 à 10^4 $m^3.s^{-1}$. Durant les vingt dernières années, à Beaucaire, 64 km en amont de l'embouchure (bouée de Roustan), les débits moyens mensuels ont été de l'ordre de 1 050 $m^3.s^{-1}$ en étiage (août) et de 2 350 $m^3.s^{-1}$ en période de crue (février). Le débit moyen annuel a été de 1715 $m^3.s^{-1}$. La mission s'est déroulée durant une phase de décroissance d'une crue brève et moyenne (2 230 à 1 280 $m^3.s^{-1}$ du 13 au 20 mai 1989), consécutive à une forte crue à la fin du mois d'avril (fig. 5). Les résultats présentés ici correspondent donc au transfert d'un débit liquide moyen à faible, dont le maximum a été enregistré le 13 mai (jour 133) à Beaucaire, 64 km en amont des bouées de Roustan. En ce qui concerne la vitesse de transfert des eaux fluviatiles vers

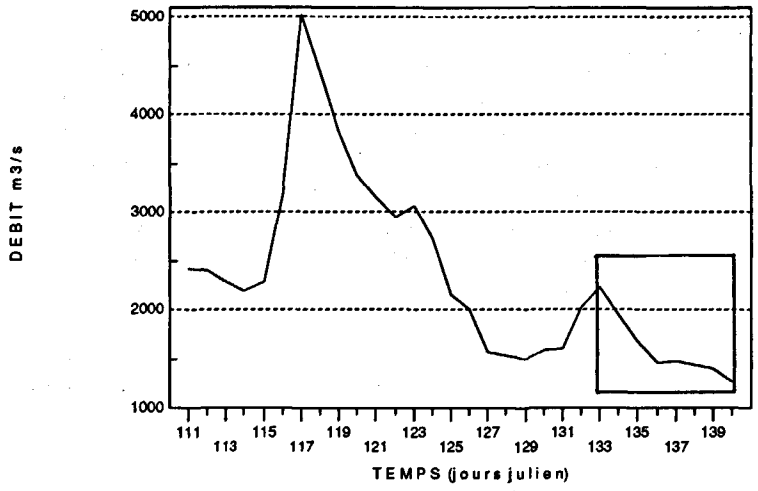


Figure 5

Débit du Rhône à Beaucaire du 21 avril au 20 mai 1989.

Rhône river discharge at Beaucaire from 21 April to 20 May.

le milieu marin, la stratification hydrologique induite par le coin salé provoque l'accélération de l'eau fluviatile superficielle, enrichie en particules fines. D'après la Compagnie Nationale du Rhône (Pont, 1992), en amont du coin salé, à Beaucaire, la vitesse du fleuve, est de l'ordre de 1,6 $m.s^{-1}$, en surface, pour un débit de 2 230 $m^3.s^{-1}$, alors que pour 1 280 $m^3.s^{-1}$, cette vitesse n'est plus que de 1,2 $m.s^{-1}$. Si de telles vitesses sont conservées tout le long de l'estuaire, il apparaît qu'à l'embouchure le maximum de débit (jour 133) en surface sera enregistré avec un décalage de 11 à 12 heures. En ce qui concerne les eaux de fond, nous avons vu que la présence du coin salé ralentit considérablement la vitesse de transfert des suspensions (Pauc, 1989), et une estimation de l'ordre de deux à trois jours peut être proposée en l'absence de toute mesure du temps de résidence des suspensions estuariennes.

Circulation générale

Le régime hydrodynamique du golfe du Lion est contrôlé par le courant liguro-provençal qui longe la pente continentale de l'est vers le sud-ouest (Millot, 1990). Son débit est de l'ordre de 10^6 $m^3.s^{-1}$ et est caractérisé par des vitesses pouvant atteindre 50 $cm.s^{-1}$ en surface. Après une période de Mistral (vents de Nord-Nord-Ouest), les eaux superficielles, situées au large de Marseille, tendent à envahir le plateau continental en formant une zone frontale qui progresse, en direction du Rhône, à des vitesses pouvant atteindre 30 $cm.s^{-1}$ (Millot et Wald, 1980). Ensuite, ces eaux se répandent, vers l'Ouest, sur tout le plateau à des vitesses de l'ordre de 5 à 10 $cm.s^{-1}$. Ces vitesses, très faibles, seront vraisemblablement encore plus basses, à proximité du fond, en raison de la friction et de la turbulence dans la couche néphéloïde benthique.

Caractéristiques hydrodynamiques instantanées

Sachant que la variabilité haute fréquence des agents dynamiques peut perturber rapidement la turbidité dans le néphéloïde de fond (d'Anglejan *et al.*, 1984) et, par conséquent, modifier les caractéristiques des particules en suspension (Sahl *et al.*, 1987), l'enregistrement des conditions dynamiques antérieures aux prélèvements permettra, non seulement d'évaluer l'intensité de la dynamique à proximité du fond, mais encore d'estimer la variabilité du milieu et ses conséquences éventuelles sur la qualité des suspensions prélevées. Les résultats présentés concernent quatorze stations, car des enregistrements ont été obtenus en 135B et 138B alors que les prélèvements hydrologiques n'ont pas réussi. N'ayant pu disposer de trois courantomètres de même type et correctement étalonnés, les données de courant sont hétérogènes et leur recalibration s'est avérée très

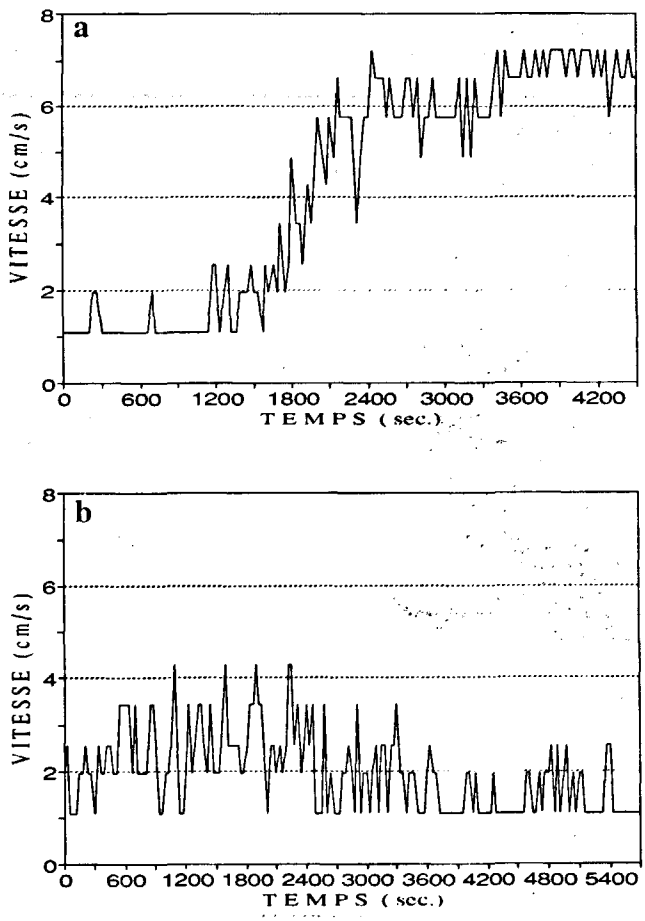


Figure 6

Vitesse du courant à 1 m au-dessus du fond. a) station139B ; b) station 137A.

Current velocities 1 m above the bottom. a) 139B station; b) 137A station.

délicate. Les enregistrements utilisés seront ceux du courantomètre Aanderaa RCM/7 (seuil de détection 2cm.s^{-1}) situé à 1 m au-dessus du fond.

Vitesses

Pendant la durée des enregistrements préalables à la prise d'échantillon (de 1 h à 2 h 45 selon les stations), les vitesses ont été trop faibles pour envisager une remise en suspension locale et les prélèvements seront représentatifs de conditions de transport advectif, et même de décantation (Gross et Williams, 1991). Les stations se regroupent de la façon suivante en ce qui concerne l'intensité dynamique :

- la station 135A, où les vitesses sont comprises entre 5,75 et 11,2 cm.s^{-1}. La vitesse moyenne est de 8,45 cm.s^{-1} ;
- les stations 139B, 138B, 137B et 136B, où 98 à 85 % des mesures sont supérieures à 2 cm.s^{-1}. Les vitesses moyennes en 138B et 136B sont respectivement de 4,2 et 3 cm.s^{-1} ;
- les stations 137A et 139A, avec 60 à 50 % des mesures supérieures à 2 cm.s^{-1} ;
- un dernier ensemble où plus de 80 % des mesures sont inférieures au seuil de détection du courantomètre. Il se compose des stations 133A, 138A, 135B, 133B, 140A, 140B et 140C. Durant les enregistrements, les vitesses ont été stables. Cependant, en 133A, 137A, 137B, 139A et 139B, les coefficients de variation sont relativement élevés (40 à 47 %), ce qui n'autorise pas la définition d'une vitesse moyenne représentative. Ces prélèvements seront donc analysés avec une attention particulière pour identifier l'influence des variations hydrodynamiques (accélération, turbulence) sur la nature des suspensions. A titre d'exemple, à la station 139B (fig. 6 *a*) on peut distinguer une phase stable, où les vitesses sont globalement inférieures au seuil de détection du courantomètre, suivie d'une phase de transition où, en une dizaine de minutes, le courant s'accélère fortement, et enfin une nouvelle phase stable où la vitesse moyenne est de 6,5 cm.s^{-1}. De même, en 137A (fig. 6 *b*), l'enregistrement se caractérise par une première phase stable, où la vitesse moyenne est de 2,5 cm.s^{-1} ; ensuite les vitesses sont structurées en périodes de dix à quinze minutes, alternativement à la limite de détection (2 cm.s^{-1}), puis inférieures.

Directions

Sachant que, pour la moitié des stations, les vitesses mesurées sont à la limite de détection du courantomètre, il est possible que, lors de la descente du bâti, l'intensité du courant, au fond, ne soit pas suffisante pour agir sur la dérive. Autrement dit, dans le cas de très faibles vitesses, la direction mesurée au moment de la pose du bâti peut ne pas correspondre à la direction réelle du courant au fond, mais être influencée par la dynamique de la masse d'eau supérieure. En conséquence, les directions mesurées aux stations à dynamique significative (135A, 139B, 138B, 137B, 136B, 137A et 139A) pourront être considérées comme pertinentes, alors que les autres mesures seront d'interprétation plus incertaine. Une grande homogénéité de direction a été constatée, et deux ensembles principaux peuvent être distingués :

- trois stations où les courants sont de secteur Sud-Est (140° à 158°). Il s'agit des stations 136B et 137A, où l'orientation du courant, au moment de la pose du bâti, était respectivement de 140° et 149°. La station 140A peut également être rattachée à ce groupe, bien que la direction mesurée (158°) risque de ne pas être représentative des conditions au fond en raison des faibles vitesses enregistrées ;
- un ensemble de stations où les courants sont de secteur Ouest-Sud-Ouest (260 à 272°). Cela concerne la station distale 139A (269°), les stations orientales 135A et 137B (270° et 272° respectivement) et les stations 138B et 139B (260° et 267°) au sud de Roustan.

Bien que globalement de secteur Ouest (238 à 287°), la station 133A (238°), réalisée à la bouée de Roustan, la station occidentale 133B (286°), la station 135B (287°) au sud de Roustan, la station distale 138A (265°) et les stations orientales 140B et 140C (265° et 274° respectivement) sont d'interprétation plus incertaine en raison des faibles vitesses enregistrées.

Caractéristiques hydrologiques

Température

A partir des données du capteur situé à 1 m au-dessus du fond, les températures stabilisées (15 à 35 minutes après la pose suivant l'intensité de la dynamique) varient de 13,49°

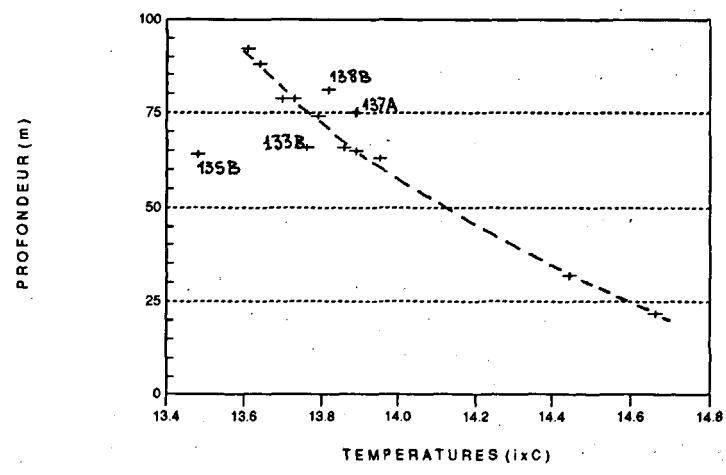


Figure 7

Relation entre température et profondeur.

Depth versus *temperature relationships*.

(135B) à 14,67° (140A) avec un «mode» situé entre 13,75° et 13,95°. La variabilité thermique entre les stations peut être exprimée par une relation inverse entre température et profondeur (fig. 7). Aux stations 135B (64 m) et 133B (66 m), on observe un écart négatif de l'ordre de 0,40° (douze fois l'écart type résiduel) et de 0,11° (trois fois l'écart-type résiduel) respectivement. Sachant que cette dernière station est antérieure au coup de vent du 14 mai, l'anomalie thermique enregistrée est vraisemblablement à relier à des conditions hydrologiques différentes de celles rencontrées durant le reste de la campagne. Les stations 137A (75 m) et 138B (80 m) s'écartent également de la courbe. Ces stations sont caractérisées par des eaux «anormalement» chaudes pour la profondeur considérée dans la mesure où un écart positif de 0,12° est noté (trois fois l'écart-type résiduel).

Salinité

Les mesures réalisées sur les prélèvements hydrologiques montrent que, dans les deux derniers mètres de la colonne d'eau, la variabilité de ce paramètre est relativement faible. Sur l'ensemble des niveaux, la salinité au fond varie de 37,374 (140A 50 cm) à 38,09 (138A 2 m). Les profils CTD (fig. 8 *a* à 8 *j*) ne montrent pas de stratification thermique ou haline nettement établie. A l'exception de la station 135A (à l'est du golfe de Fos), la nappe de dilution du Rhône, de 1 à 2 m d'épaisseur, moins salée et plus chaude que l'eau sous-jacente, se marque sur tous les profils. La très grande extension du néphéloïde de surface a pu être observée jusqu'à la fin de la mission, dans la mesure où des auréoles de production, se développant en périphérie du panache turbide superficiel, ont été rencontrées aux stations les plus distales (138A, 139A et 140C).

Néphélométrie

Les néphéloïdes de surface et de fond sont clairement identifiables sur les profils néphélomètriques. Ils sont séparés par une masse d'eau claire où la turbidité moyenne, de l'ordre de 0,2 FTU, peut atteindre localement 0,5 FTU (fig. 8 *a* à 8 *j*). Le néphéloïde benthique montre une grande variabilité de concentration (jusqu'à 4 FTU) et d'épaisseur (de 2 à 30 m). Globalement, sa structuration est très hétérogène au début de la campagne, et son ampleur a diminué progressivement vers les derniers jours de la mission.

Le matériel particulaire

La concentration en particules (MES) est, en général, plus élevée à proximité du fond. Globalement, la charge des trois niveaux des différentes stations a diminué au cours de la mission (tab. 1). Les stations les plus proches de l'embouchure sont, en général, les plus chargées, bien qu'en 140A des concentrations très basses aient été mesurées. Les teneurs en carbone total (C x 100/MES) décroissent depuis la partie supérieure (2 m) vers le fond. Les teneurs mesurées à 2 m sont relativement constantes (coefficient de variation CV = 7,8 %), alors que dans le dernier mètre, la variabilité est plus élevée (CV = 17,2 et 20,5 % à 1 m et 50 cm). Les taux de carbone organique particulaire (COP x 100/MES) décroissent, également, entre 2 m et 50 cm. A l'inverse du carbone total, les teneurs en COP sont relativement constantes (CV = 10,7 %) à proximité du fond, alors que plus on s'en éloigne, plus la variabilité s'accroît (CV = 22,2 et 38,2 % à 1 et 2 m). Les teneurs les plus basses, sur l'ensemble des niveaux, concernent des stations ayant la charge particulaire la plus élevée (136B, 137A, 138A). Le carbone inorganique particulaire (CIP/MES), déduit de la différence entre les teneurs en carbone total (C/MES) et en COP (COP/MES), permettra de suivre la variabilité des taux de carbonates. Les teneurs en azote particulaire (Npar x 100/MES) sont, en général, plus élevées à 2 m qu'à proximité du fond, et sont globalement peu variables (CV = 14,8 ; 19,6 et 17.8 % de 50 cm à 2 m). Globalement, les taux les plus faibles sont observés aux stations les plus chargées (133A, 136B, 137A et 138A), et les teneurs les plus élevées concernent les stations à faible concentration en particules (140A, 140B et 140C). Les teneurs en pigments chlorophylliens totaux (PIG x 1000/MES) varient de 0,001 à 0,031 x 10^{-3} et sont, en général, plus élevées à 2 m qu'à 50 cm au-dessus du fond. Au niveau inférieur (50 cm), la variabilité des teneurs est élevée (CV = 92,5 %), alors que, pour les niveaux supérieurs, elle est un peu moins grande et similaire à 1 et 2 m (CV = 75,9 et 70,8 % respectivement). Les stations les plus pauvres (133B, 136B, 137A et 138A) ont une forte charge particulaire, et la station la plus riche (140A) est située à l'embouchure du Rhône. La chlorophylle *a* représente entre 38 et 94 % de la masse pigmentaire, les taux de phéophorbide fluctuent entre 0,25 et 45 %, ceux de phéophytine *a* de 0 à 34 %, et les autres composés pigmentaires sont faiblement représentés.

DISCUSSION

Les résultats généraux qui viennent d'être présentés tendent à mettre en évidence deux types de néphéloïde : celui lié au domaine rhodanien, à charge particulaire élevée sur les derniers mètres de la colonne d'eau, et celui lié au domaine ligure, où la charge particulaire est faible, même à proximité du fond. En réalité, cette distinction spatiale est plus complexe et la station de l'embouchure, par exemple, passe de la charge particulaire la plus élevée (133A) à une des plus faibles (140A), en l'espace de sept jours. Autrement dit, sur une même localisation géographique, la nature des suspensions du néphéloïde benthique est fondamentalement modifiée sur une échelle de temps relativement courte. A travers l'étude des suspensions et des données hydrologiques, nous allons tenter de préciser la fréquence temporelle et spatiale de cette variabilité, et d'identifier les phénomènes qui en sont responsables.

Variabilité hydrologique

Les mesures CTD et de néphélométrie, réalisées sur une radiale Nord-Est Sud-Ouest de stations occupées selon un suivi temporel croissant (135B, 136B, 137A, 138B et

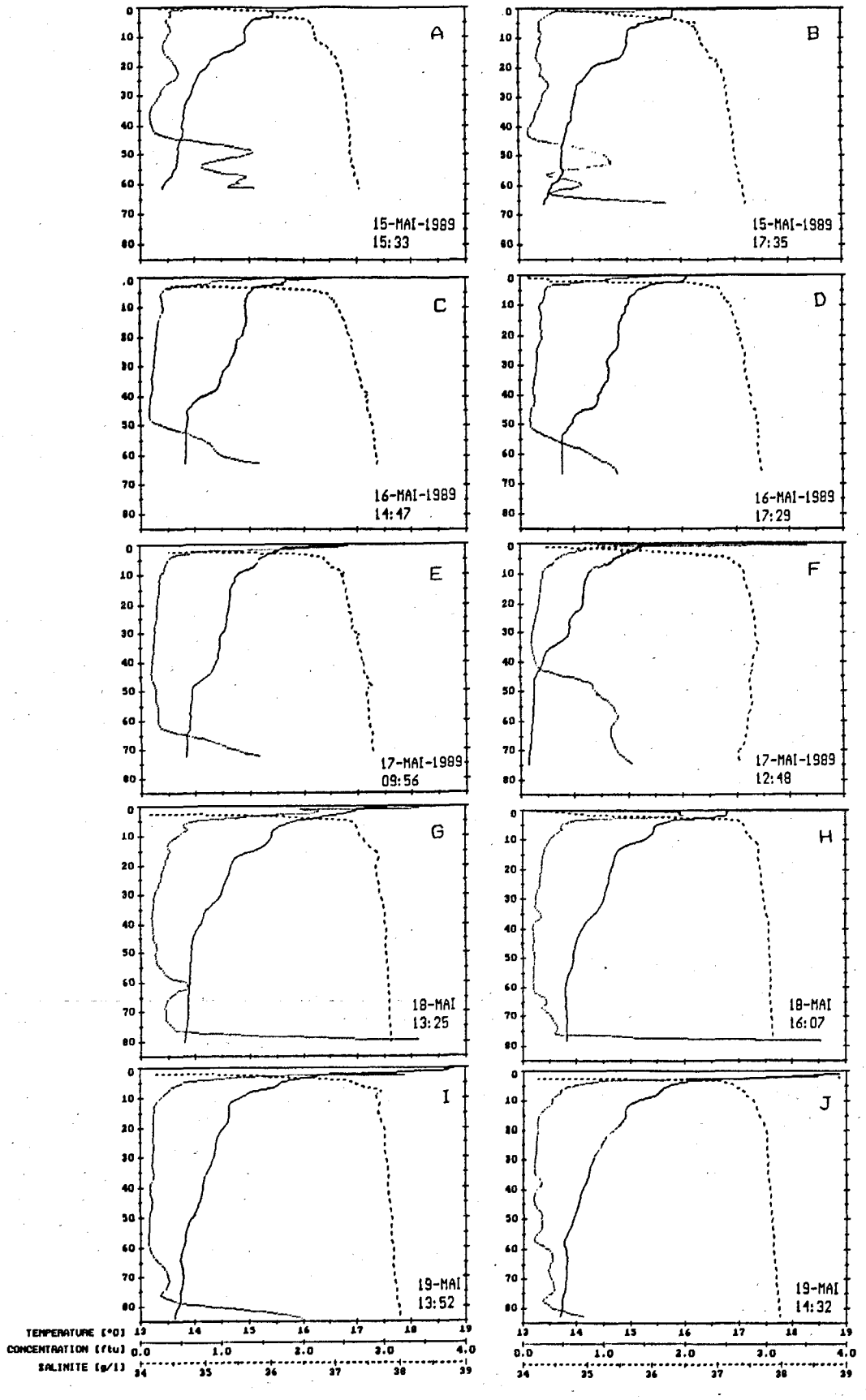


Figure 8

Profils hydrologiques : a) station 135B à 15 h 33 ; b)station 135B à 17 h 35 ; c) station 136B à 14 h 47 ; d) station 136B à17 h 29 ; e) station 137A à 9 h 56 ; f) station 137A à 12 h 48 ; g) station 138B à 13 h 25 ; h) station 138B à 16 h 07 ; i) station 139B à13 h 52 ; j) station 139B à 14 h 32.

Hydrological profiles: a) 135B station at 15 h 30; b) 135B station at 17 h 35; c) 136B station at 14 h 47; d) 136B station at 17 h 29; e)137A station at 9 h 56; f) 137A station at 12 h 48; g) 138B station at 13 h 25; h) 138B station at 16 h 07; i) 139B station at 13 h 52; j)139B station at 14 h 32.

139B), permettent de caractériser les différents états hydrologiques successifs :

- En 135B (62 m), le néphéloïde est très chargé (1,5 à 2 FTU), très développé (1/3 de la colonne d'eau) et très hétérogène en concentration. Les dix derniers mètres de la colonne sont plus froids et légèrement plus salés que la tranche d'eau sus-jacente (fig. 8 *a*). Cette station est caractérisée par des températures basses (fig. 7) et une dynamique très faible d'Ouest-Nord-Ouest, (287°) qui se corrèle mal avec la direction des courants observée le lendemain

à la station 136B voisine (140°). De tels phénomènes ne peuvent s'expliquer que par une intrusion d'eau marine du large, mise en place par upwelling lors du coup de vent du 14 mai. En l'espace de deux heures, il y a peu de modifications thermique et haline (fig. 8 *b*). Par contre, il y a accroissement de la turbidité dans le dernier mètre de la colonne d'eau (1,6 à 1,9 FTU) et décroissance jusqu'à la limite supérieure de l'intrusion saline. Les faibles vitesses enregistrées dans cette masse d'eau (95 % < 2 $cm.s^{-1}$) permettraient la décantation des suspensions et expliqueraient la variabilité de la néphélométrie dans cette tranche d'eau. Au-dessus de l'intrusion saline (56 m), la néphélométrie, qui atteint un minimum, croît régulièrement jusque vers 50 m de profondeur, pour décroître ensuite tout aussi régulièrement jusqu'à une profondeur de 42 m. Une telle disposition illustrerait un néphéloïde reposant sur le gradient de densité que forme l'intrusion saline, le décalage entre le maximum de néphélométrie (50 m) et le toit de ce gradient (56 m) pouvant traduire l'existence de forces de cisaillement entre les deux masses d'eau, empêchant l'accumulation particulaire ;

- En 136B (67 m), 24 heures plus tard et 1/4 de mille au sud-ouest de la station précédente, le néphéloïde benthique est toujours très chargé (1,5 FTU). Il est un peu moins développé (15 m) et présente, à proximité du fond, un gradient croissant de charge régulier (fig. 8 *c*). En l'espace de 2 h 40, les paramètres hydrologiques sont restés stables (fig. 8 *d*). Par rapport à la station 135B, la direction du courant au fond s'inverse (287° à 140°) et des vitesses stables (3$cm.s^{-1}$) s'établissent. La température au fond atteint des valeurs comparables à celles de la masse d'eau précédemment située juste au-dessus de l'intrusion marine, et les températures mesurées entre 15 et 40 m de profondeur augmentent fortement. En 24 heures, l'intrusion marine a disparu et des conditions hydrologiques homogènes se sont établies à proximité du fond. Cette organisation, conforme au schéma de Richards (1990), indiquerait une circulation advective d'intensité de plus en plus faible à proximité du fond, permettant le dépôt lent de particules situées, 24 heures plus tôt, au-dessus de l'intrusion saline ;

- En 137A (73 m), 13 heures plus tard et 1/2 mille au sud-ouest de 136B, le néphéloïde est toujours très chargé (1,5 FTU). Il est un peu moins développé (10 m) et présente un gradient croissant de charge régulier (fig. 8 *e*). Les caractéristiques hydrologiques sont comparables à celles observées en 136B. La variabilité temporelle est très importante dans la mesure où, 2 h 45 plus tard, la salinité et la température ont diminué de plus d'un demi-point, et l'épaisseur du néphéloïde a été triplée (fig. 8 *f*). La néphélométrie étant demeurée sensiblement constante (1 à 1,5 FTU), malgré cet accroissement de hauteur, il n'y a donc pas eu dilution dans une masse d'eau plus importante, mais apport particulaire. Sachant qu'une variation de périodicité et de vitesse du courant a été enregistrée (fig. 6 *b*), ces modifications peuvent être liées à l'installation d'un régime dynamique basse fréquence au sein d'une masse d'eau ayant de nouvelles caractéristiques hydrologiques ;

- En 138B (81 m), 24 heures plus tard et 1/4 de mille au sud-est de la station précédente, le néphéloïde est fortement chargé dans les deux derniers mètres de la colonne d'eau (4 FTU) et présente des accroissements locaux de concentration ne dépassant pas 0,5 FTU dans les vingt derniers mètres (fig. 8 *g*). Les paramètres hydrologiques et la vitesse du courant sont restés stables durant les 2 h 45 d'enregistrement (fig. 8 *h*). Les caractéristiques hydrologiques sont comparables à celles observées en 137A, avant la mise en place de la masse d'eau de salinité et de température plus basse (fig. 8 *e*). La néphélométrie de la partie inférieure du néphéloïde (4 FTU) est demeurée stable, alors que celle de la partie supérieure a été beaucoup plus variable. Cette organisation pourrait traduire le fait que la couche concentrée, située à proximité du fond, serait suffisamment dense pour ne pas être affectée par le courant relativement faible enregistré à 1 m au-dessus du fond (4 $cm.s^{-1}$), alors que la partie supérieure serait soumise à une hydrodynamique plus intense ;

- En 139B (86 m), 24 heures plus tard et 1/2 mille au sud-ouest de 138B, la néphélométrie est élevée (2 FTU) dans les quatre derniers mètres de la colonne d'eau et, comme en 138B, elle est beaucoup plus faible (0,4 FTU) jusque vers 50 m de profondeur (fig. 8 *i*). Les caractéristiques hydrologiques sont comparables à celles de la station précédente (138B). En l'espace de quarante minutes, la structure du néphéloïde a été notablement modifiée (fig. 8 *j*), sans perturbation thermique ou haline importante. En effet, la néphélométrie de la partie inférieure a considérablement diminué (0,8 FTU), et la hauteur de la partie supérieure s'est fortement accrue. Les données courantométriques (fig. 6 *a*) montrent une accélération de l'intensité du courant (6,5 $cm.s^{-1}$), qui pourrait être à l'origine de la destructuration du néphéloïde et de sa dilution dans la partie supérieure de la colonne d'eau.

Variabilité du matériel particulaire

En domaine côtier et à proximité d'un fleuve, la matière organique particulaire est principalement d'origine continentale (Cauwet *et al.*, 1990), mais comporte également une fraction marine plus ou moins importante, où la production primaire joue un rôle essentiel (Morel, 1989). La prépondérance de ces deux influences s'inverse progressivement de l'estuaire vers la mer, et peut être suivie par différents traceurs (Eisma *et al.*, 1985). Sachant que la stratégie d'échantillonnage mise en oeuvre a permis de prélever le néphéloïde rhodanien (Roustan) et marin, à l'est du Rhône, l'analyse du matériel recueilli aux stations intermédiaires devrait permettre de mieux cerner les processus qui interviennent au cours du transfert en milieu marin.

Relations entre paramètres

· Analyse statistique

Afin d'étudier la cohérence interne des descripteurs biogéochimiques utilisés, une Analyse en Composantes Principales (ACP) des valeurs, centrées et réduites, de concentration en particules (MES) et de teneur en COP, CIP, Npar et PIG, de chacun des trois niveaux (numérotés de 1 à 36) des douze stations a été effectuée. Les mesures de courant n'ont pas été intégrées à l'ACP en raison de leur

manque d'homogénéité. Les pourcentages expliqués par les axes 1 (horizontal) et 2 (vertical) sont, respectivement, de 55,2 et 31 %, soit plus de 86 % de la variance totale (fig. 9 *a*). Cette ACP met en évidence une relation inverse entre la charge particulaire (MES) et les autres paramètres, et montre que la variabilité des carbonates (CIP) est indépendante de celle d'un ensemble formé par COP, Npar et PIG.

· Signification

La décorrélation entre les carbonates et le groupe COP, PIG et Npar montre que ces paramètres ont une origine différente qui, dans le cas du système rhodanien, peut être liée à la nature mixte (continentale et marine) des suspensions échantillonnées. La calcite des eaux fluviatiles est principalement liée aux produits d'érosion des roches du bassin versant. Les teneurs varient entre 2 et 3 %, et concernent une classe granulométrique précise (Irion, 1991). Au contact du domaine marin, l'apport de carbonate biogène, lié à la biomasse planctonique, accroît ces teneurs et modifie le rapport $^{13}C/^{12}C$ du CIP, par exemple (Mook et Tan, 1991). Cependant, la biomasse planctonique n'est pas nécessairement carbonatée et, en domaine rhodanien, elle est même fréquemment siliceuse (Margalef, 1984). Ce phénomène peut expliquer la décorrélation CIP/COP, car la croissance des teneurs en COP, induite par des diatomées, n'entraîne pas celle des carbonates. Dans le cadre du suivi de l'évolution des apports rhodaniens en milieu marin, l'augmentation des teneurs en CIP indiquera donc une influence marine grandissante. En ce qui concerne le COP, la signification de ce paramètre global est plus complexe

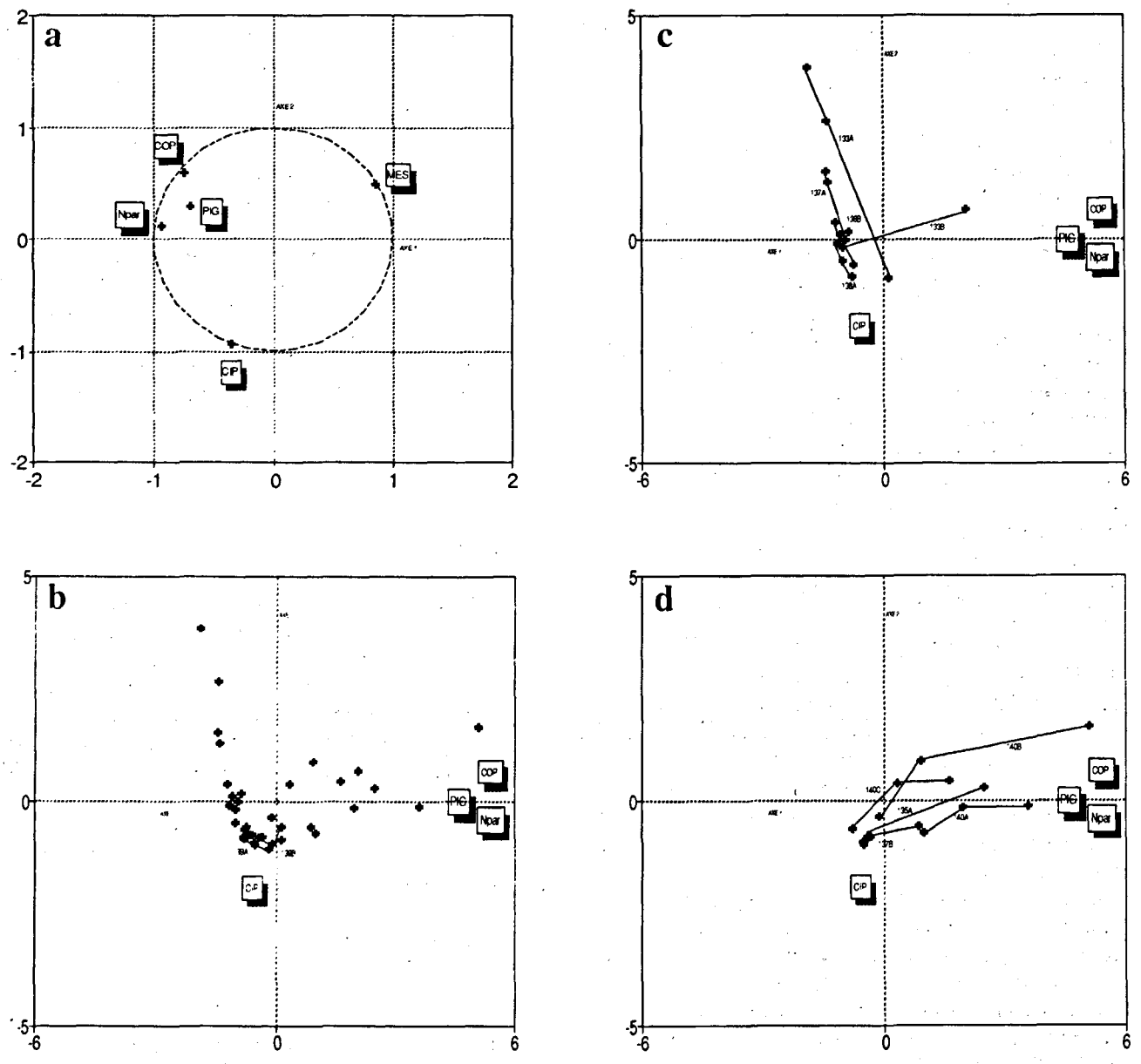


Figure 9

Analyse en composantes principales des teneurs en particules (MES), pigments totaux (PIG), carbone organique (COP), inorganique (CIP) et azote (Npar) particulaires : a) cercle de corrélation ; b) distribution des niveaux ; c) le néphéloïde pauvre en COP ; d) le néphéloïde riche en COP.

Principal component analysis of particle concentration (MES) percentages of total pigments (PIG), particulate nitrogen (Npar), organic (COP) and inorganic carbon (CIP): a) correlation circle; b) level distribution; c) the low content COP nepheloid; d) the high content COP nepheloid.

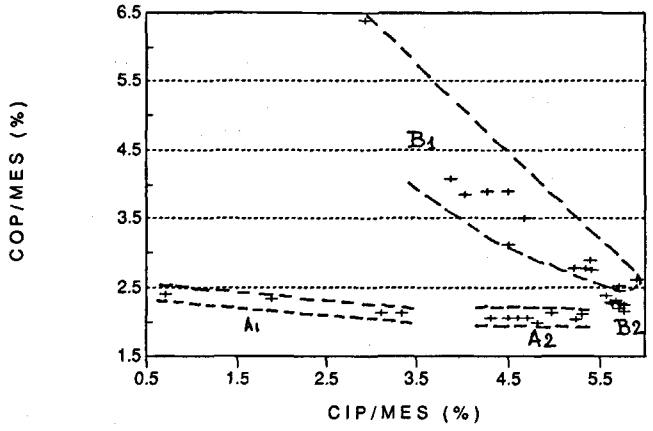


Figure 10

Relation entre teneurs en Carbone Particulaire Inorganique (CIP) et Organique (COP).

Relationships between organic (COP) and inorganic particulate carbon (CIP) percentages.

en raison de la diversité des ses origines en domaine prodeltaïque. Les teneurs en COP des suspensions du Rhône varient de 1,8 à 2,5 % et, selon l'intensité d'érosion des sols, une matière organique plus ou moins dégradable est transférée vers le milieu marin (Kempe *et al.*, 1991). En mer, des teneurs supérieures à 10 % peuvent être rencontrées à la périphérie du panache du Rhône, en liaison avec des poussées phytoplanctoniques (Lochet et Leveau, 1990). Du point de vue des processus, il est donc essentiel de séparer la fraction labile (carbohydrates, protéines) de la partie réfractaire, non minéralisable et stockable dans le sédiment (Ittekkot et Laane, 1991). En ce qui concerne la fraction labile, deux sources principales existent en milieu marin : le phyto- et le zooplancton. Le rapport entre les concentrations en COP et en pigments chlorophylliens (PIG) doit permettre d'estimer l'importance de la contribution phytoplanctonique dans la matière organique totale. De même, le rapport entre les concentrations en COP et en azote particulaire (Npar) doit permettre d'estimer l'état de fraîcheur du matériel biogène marin dans la mesure où la fraction azotée peut être considérée comme liée à la présence de matériel protéique (Redfield *et al.*, 1963 ; Goldman, 1980).

Relations entre niveaux

• Analyse statistique

A partir des trois pôles définis par l'ACP, des stations ou niveaux aux caractéristiques communes peuvent être regroupés en trois ensembles (fig. 9 *b*) : un ensemble constitué par les niveaux 2 et 1 m de stations dont les suspensions sont riches en COP, Npar et PIG ; un ensemble de stations riches en carbonates, sans niveaux préférentiels particuliers ; un ensemble formé par les niveaux 50 cm et 1 m de stations pauvres en carbonates, COP, Npar et PIG. Si on replace chaque station dans le diagramme en regroupant leurs trois niveaux (fig. 9 *c*), on constate que, dans la population située à gauche du diagramme de la figure 9 *b* (133A, 137A, 136B, 138A et niveaux de fond de 133B), le phénomène majeur est un enrichissement en carbonates de la base (50 cm) vers le sommet (2 m). Pour la population située à droite du diagramme de la figure 9 *b* (135A, 140B, 140 C, 140A et 137B), le phénomène inverse est observé au profit d'un enrichissement en COP, Npar et PIG des niveaux supérieurs (fig. 9 *d*). Dans le pôle carbonate, enfin, les stations 139A et 139B n'ont pas de gradient marqué, et les trois niveaux présentent des teneurs comparables en COP, CIP, Npar et PIG (fig. 9 *b*). Deux populations sont apparemment mises en évidence. L'une, pauvre en COP et à concentration en particules plus ou moins élevée ; l'autre, riche en COP et faiblement chargée. Cependant, le néphéloïde benthique semble plutôt être le siège d'une évolution continue des suspensions. En effet, des niveaux situés à 2 m au-dessus du fond du néphéloïde pauvre en carbone peuvent présenter des caractéristiques comparables à celles des niveaux de fond du néphéloïde riche en carbone, et au sein d'une même station, un niveau peut présenter les caractéristiques propres à l'un des néphéloïdes alors que les autres niveaux sont de l'autre type.

Tableau 2

Teneurs en carbone inorganique particulaire (CIP) et carbone organique particulaire (COP) regroupées en fonction des relations entre ces deux paramètres.

Groups of particulate inorganic carbon (CIP) and particulate organic carbon (COP) percentages based on the relationships observed between the two parameters.

Niveaux	Stades	Groupe A1		Groupe A2		Groupe B1		Groupe B2	
		COP%	CIP%	COP%	CIP%	COP%	CIP%	COP%	CIP%
133A 2 m	II							2,32	5,68
133A 1 m	IV	2,34	1,89						
133A 5 m	IV	2,40	0,72						
133B 2 m	I					4,08	3,88		
133B 1 m	III			2,12	4,98				
133B 5 m	III			2,07	4,31				
135A 2 m	I					3,91	4,28		
135A 1 m	I					2,61	5,91		
135A 5 m	II							2,19	5,71
136B 2 m	III			2,10	5,31				
136B 1 m	III			2,06	4,72				
136B 5 m	III			2,07	4,50				
137A 2 m	III			2,07	4,62				
137A 1 m	IV	2,14	3,10						
137A 5 m	IV	2,12	3,33						
137B 2 m	I					2,87	5,40		
137B 1 m	II							2,30	5,62
137B 5 m	II							2,15	5,77
138A 2 m	III			2,04	5,25				
138A 1 m	II							2,24	5,76
138A 5 m	III			2,00	4,83				
139A 2 m	II							2,26	5,71
139A 1 m	II					2,52	5,72		
139A 5 m	II							2,28	5,73
139B 2 m	I					2,76	5,41		
139B 1 m	II							2,16	5,76
139B 5 m	II							2,26	5,65
140A 2 m	I					3,91	4,50		
140A 1 m	I					3,13	4,51		
140A 5 m	I					2,77	5,35		
140B 2 m	I					6,37	2,94		
140B 1 m	I					3,86	4,03		
140B 5 m	I					2,77	5,23		
140C 2 m	I					3,90	4,28		
140C 1 m	I					3,51	4,69		
140C 5 m	II							2,39	5,57

• Relations carbonates-carbone organique particulaire

La distribution du CIP en fonction du COP (fig. 10) permet de préciser les informations apportées par l'ACP sur les teneurs en COP, CIP, Npar et PIG (fig. 9 *b*). Quatre groupes sont distingués (tab. 2) :

- le groupe A1 (niveaux de fond des stations 133A et 137A) est caractérisé par des teneurs en COP comprises entre 2,4 et 2,1 % et des teneurs en CIP très faibles et très variables (0,7 à 3,3 %). L'existence d'une relation entre le contenu en particules des stations 133A et 137A confirmerait que les modifications hydrologiques, enregistrées le 17 mai (fig. 8 *f*), correspondent à la mise en place d'une masse d'eau influencée par les apports rhodaniens. La faiblesse des taux de carbonates en 133A souligne l'origine fluviatile dominante des suspensions, alors que pour 137A l'accroissement observé est tel qu'il indique une influence marine grandissante ;

- le groupe A2 (stations 136B, 138A et niveaux de fond de 133B), où les taux de CIP varient de 4,3 à 5,3 % (moyenne à 4,8 %) et les teneurs en COP sont constantes (2 à 2,12 % - moyenne à 2,07 %). La différence de composition entre des stations très proches de l'embouchure (136B, 137A), mais échantillonnées à 13 heures d'intervalle, confirme l'aspect impulsionnel des apports du Rhône sur le plateau continental. En effet, bien que plus proche de l'embouchure que la 137A, la station 136B présente des caractéristiques similaires aux stations 138A, la plus profonde, et 133B, que l'étude de la variabilité thermique avait permis de situer dans le cadre de conditions hydrologiques différentes. Ainsi, ces dernières stations peuvent être considérées comme représentatives d'une influence rhodanienne antérieure à celle du 17 mai ;

- le groupe B1 (stations 135A, 140B, 140C et 140A), où les teneurs en COP sont très variables (2,5 à 6,4 %). Plus les taux de COP sont forts, plus les teneurs en CIP sont faibles (5,9 à 2,9 %). Les stations de ce groupe, situées à l'est du Rhône, se trouvent donc hors de son influence directe, et peuvent être considérées comme représentatives du néphéloïde marin côtier. Ce groupe comprend la station réalisée le dernier jour à la bouée de Roustan (140A). Ainsi, en l'espace de sept jours et en corrélation avec la baisse du débit fluvial, les apports rhodaniens en milieu marin se sont considérablement modifiés ;

- le groupe B2 (stations 137B, 139A et 139B), où les teneurs en COP varient de 2,15 à 2,4 % (moyenne à 2,26 %) et les taux de CIP sont remarquablement homogènes (5,57 à 5,77 %, moyenne à 5,7 %). Ce groupe se différencie de B1 uniquement par des teneurs en COP plus basses. On remarquera que ces stations sont mixtes et présentent toutes un niveau appartenant au groupe B1. On notera aussi que ces stations ont enregistré des variations hydrodynamiques à haute fréquence temporelle qui ont conduit à la disparition du gradient de charge du néphéloïde. En 139A et 139B, l'ACP a montré l'absence de caractéristiques marquées (fig. 9 *b*).

• Relations pigments-azote organique particulaire

L'étude des relations entre les rapports COP/Npar et COP/PIG (fig. 11) permet de compléter l'étude de l'évolu-

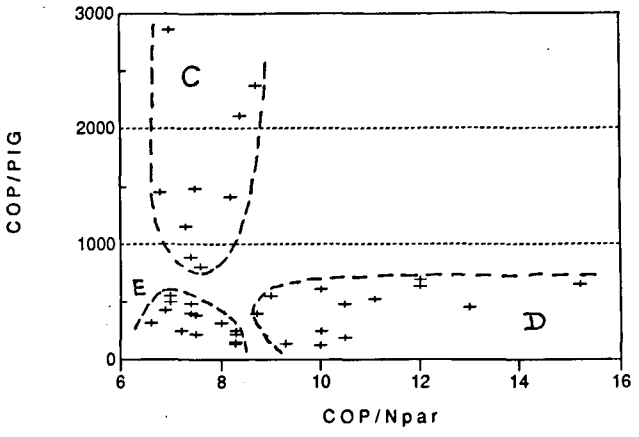


Figure 11

Relation entre concentrations en pigments totaux (PIG) et azote particulaire (Npar), normalisées au carbone organiqueparticulaire (COP).

Relationships between total pigments (PIG) and particulate nitrogen (Npar) concentrations normalized to particulate organic carbon (POC).

Tableau 3

Concentrations en pigments totaux (PIG) et azote particulaire (Npar), normalisées au carbone organique particulaire (COP) et regroupées en fonction des relations entre ces deux paramètres.

Concentrations of total pigments (COP) and particulate nitrogen(Npar) normalized to particulate organic carbon (POC) and classified on the basis of the relationship observed between the two parameters.

Niveaux	Stades	Groupe C		Groupe D		Groupe E	
		COP Npar	COP PIG	COP Npar	COP PIG	COP Npar	COP PIG
133A 2 m	II					8,3	147
133A 1 m	IV			11,1	527		
133A 5 m	IV			15,3	654		
133B 2 m	I			10,0	611		
133B 1 m	III	7,4	879				
133B 5 m	III	7,5	1519				
135A 2 m	I			10,5	202		
135A 1 m	I			10,0	255		
135A 5 m	II					7,0	511
136B 2 m	III					7,0	547
136B 1 m	III					7,5	390
136B 5 m	III					7,4	404
137A 2 m	III	7,3	1178				
137A 1 m	IV	8,7	2411				
137A 5 m	IV	8,4	2043				
137B 2 m	I					8,3	230
137B 1 m	II					7,4	485
137B 5 m	II					6,9	434
138A 2 m	III	6,8	1473				
138A 1 m	II	7,6	808				
138A 5 m	III	7,0	2921				
139A 2 m	II					7,2	259
139A 1 m	II					8,3	256
139A 5 m	II					7,5	224
139B 2 m	I			8,7	413		
139B 1 m	II					6,6	324
139B 5 m	II					8,0	317
140A 2 m	I			10,0	125		
140A 1 m	I					8,3	164
140A 5 m	I			9,3	146		
140B 2 m	I			13,0	459		
140B 1 m	I			12,0	693		
140B 5 m	I			9,0	557		
140C 2 m	I			10,5	497		
140C 1 m	I			12,0	635		
140C 5 m	II	8,2	1378				

tion de la fraction carbonatée, qui vient d'être présentée, par une analyse détaillée de la partie labile de la fraction carbonée. Trois groupes sont différenciés (tab. 3) :

- le groupe C (stations 133B, 137A et 138A), où le matériel organique est frais (COP/Npar de 6,8 à 8,7) et la contribution phytoplanctonique faible (COP/PIG de 808 à 2921). La pauvreté en pigments peut être liée à la profondeur (138A) ou à des conditions hydrologiques différentes (133B). Par contre, en 137A, cette pauvreté est difficilement explicable car la station 136B, voisine, et échantillonnée treize heures auparavant, est plus riche en pigments. Cette anomalie est à corréler avec la différence des taux de carbonates précédemment notée (fig. 10), et on peut penser que le néphéloïde pauvre en phytoplancton et en CIP échantillonné le 17 mai par 75 m de fond (137A) a remplacé un néphéloïde préexistant, plus riche en pigments et en carbonates (136B). Ceci conforte donc l'hypothèse de la mise en place impulsionnelle d'une masse d'eau de nature différente apportant un nouveau stock de particules (fig. 8 *e*-8 *f*) ;

- le groupe D (stations 133A, 135A, 140A, 140B et 140C), où la contribution d'origine phytoplanctonique est notable (COP/PIG de 125 à 693) et le matériel organique sensiblement plus dégradé que précédemment (COP/Npar de 8,7 à 15,3). Les stations de ce groupe sont situées à l'est du Rhône et à l'embouchure. Un rapport COP/Npar relativement élevé semble donc être l'une des caractéristiques du néphéloïde marin et de celui issu du Rhône. Cependant, pour le néphéloïde ligure, ce rapport demeure toujours fort dans l'espace (cap Couronne, large du golfe de Fos) et dans le temps (135A-140B), alors que pour le néphéloïde issu du Rhône, une diminution rapide de ce rapport se produit en quelques jours, entre le sommet du prodelta (133A-140A) et sa base (133A-137A) ;

- le groupe E (stations 136B, 137B, 139A et 139B), où la contribution d'origine phytoplanctonique est notable (COP/PIG de 147 à 547) et le matériel organique frais (COP/Npar de 6,6 à 8,3, CV = 7.1 %). Ce groupe, qui diffère du groupe C par sa richesse en pigments, permet donc de suivre les apports phytoplanctoniques dans le néphéloïde. Ainsi, aux stations les plus profondes échantillonnées le 19 mai (139A-139B), la concentration relative en pigments est élevée, alors que la veille et à des profondeurs comparables (138A), le néphéloïde de fond était beaucoup plus pauvre. De même, la contribution notable en phytoplancton enregistrée le 16 mai dans le néphéloïde près de l'embouchure (136B) sera remplacée, le lendemain, par l'arrivée impulsionnelle d'une masse d'eau pauvre en phytoplancton (137A). Enfin, dès le 17 mai, le néphéloïde benthique situé au large du golfe de Fos (137B) a bénéficié d'apports phytoplanctoniques qui sont vraisemblablement contemporains de ceux enregistrés la veille en 136B, à moins qu'ils ne soient issus du golfe de Fos proche (Lochet, 1987).

Stades d'évolution

L'apport impulsionnel de matériel rhodanien (137A), les perturbations hydrodynamiques instantanées (139B, 139B, 137B), constituent autant d'événements qui modifient plus ou moins profondément les caractéristiques des suspensions et se surimposent à l'évolution continue des particules transférées du milieu fluviatile vers le domaine marin. Ces événements permettent de distinguer différents stades dans l'évolution du néphéloïde de fond, contribuant ainsi à l'identification des processus qui interviendraient dans cette évolution.

- Le stade le plus «ancien» (I) est caractérisé par des teneurs en COP, CIP et Npar très variables (B1) et les taux de pigments parmi les plus élevées (D). Ces caractéristiques sont principalement observées aux niveaux supérieurs (1-2 m) du néphéloïde marin côtier (135A-140B-140C) et à l'embouchure, le 20 mai (140A). Les suspensions de ces niveaux, où le rapport COP/Npar est relativement fort (9 à 13), seraient représentatives d'un néphéloïde de domaine marin ouvert, principalement influencé par la variabilité de la production primaire superficielle.

- Un stade «récent» (II) est rencontré aux niveaux inférieurs (50 cm-1 m) des stations 137B, 139A et 139B et dans les niveaux de fond (50 cm) du néphéloïde marin côtier (135A-140C). Les teneurs en COP, CIP et Npar sont beaucoup plus homogènes que précédemment (B2), et les taux de pigments sont relativement importants (E). Les suspensions de ces niveaux, où le rapport COP/Npar varie de 6,6 à 8,3 (moyenne à 7,5), seraient mixtes, et composées à la fois de matériel frais et de matière organique dégradée, transportée par le courant liguro-provençal ou remobilisée par les perturbations hydrodynamiques instantanées.

- Un stade «très récent» (III) est rencontré aux stations 133B, 136B et 138A. Les taux de COP sont au plus bas (A2), les teneurs en pigments sont basses et le rapport COP/Npar, très stable, est à son minimum (C). Ces suspensions représenteraient un néphéloïde, influencé par les apports du Rhône, où le matériel d'origine biogène est en plein développement.

- Un stade «précoce» (IV) peut être caractérisé aux stations 133A et 137A. A l'embouchure (133A), les taux de CIP, de Npar et de pigments sont les plus faibles (A1 et C). Cette station peut donc être considérée comme représentative de suspensions où l'empreinte continentale est très marquée. Par contre, en 137A, sans atteindre les valeurs mesurées aux stations proches, les teneurs en carbonates sont plus élevées et la forte décroissance du rapport COP/Npar montre que la fraction protéique est devenue plus importante. Autrement dit, les suspensions de ces stations ont une origine commune, mais la distance à l'embouchure a permis une «marinisation» du matériel particulaire du néphéloïde de la station 137A durant le transfert vers le milieu marin.

Les mécanismes

Ces stades successifs, aux teneurs en éléments assez bien caractérisées, semblent donc traduire différents «états» du néphéloïde benthique. Dans l'exemple étudié, les stations les plus riches en suspensions sont celles où les particules ont été récemment émises dans le milieu marin (stades III-IV). Inversement, les stations les moins chargées sont celles où les suspensions sont les plus évoluées (stade I). La variation de la concentration particulaire constituerait donc un dénominateur commun reliant à la fois temps de résidence des particules et «état» du néphéloïde benthique.

L'étude de la variation des taux de carbonate (CIP), carbone organique (COP), azote particulaire (Npar) et pigments totaux (PIG), classés en fonction d'une charge décroissante (fig. 12 *a*, 12 *b*, 12 *c*, 12 *d*), doit permettre de suivre les modifications de la nature des suspensions du néphéloïde benthique qui interviennent au cours de son transfert vers le milieu marin.

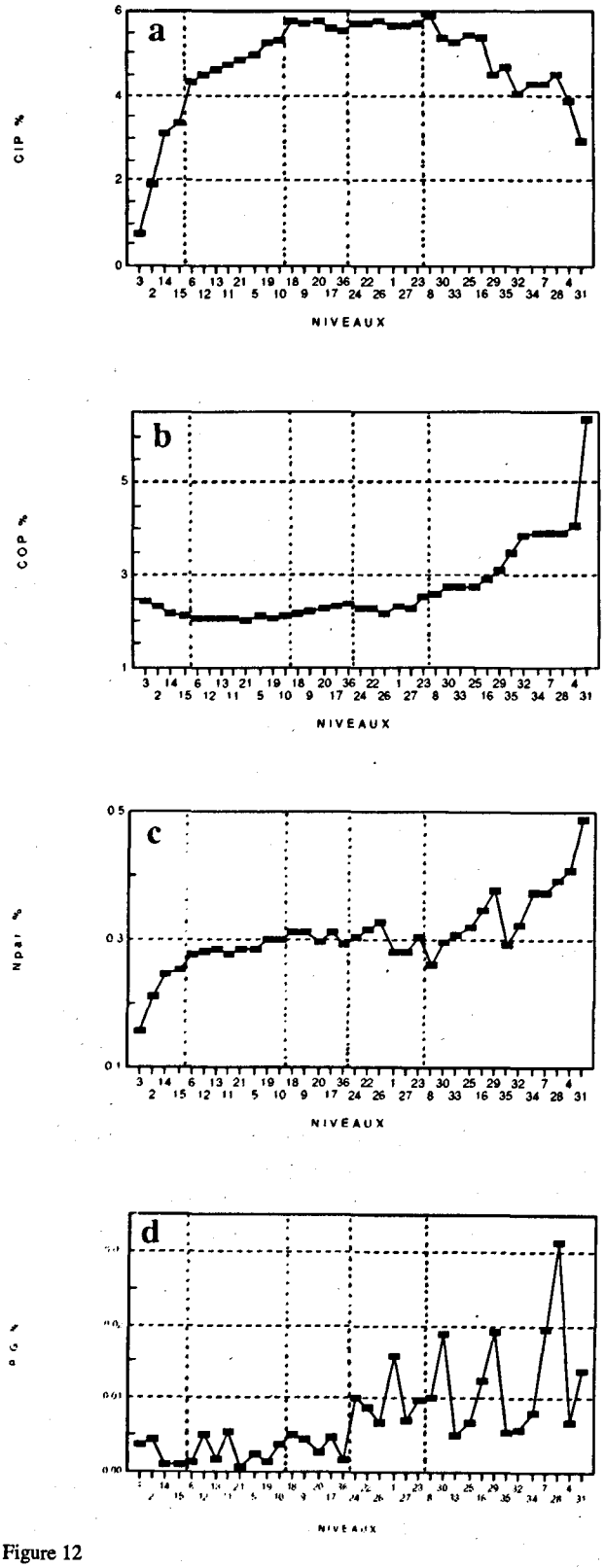


Figure 12

Teneurs en : a) carbone inorganique particulaire (CIP) ; b) carbone organique particulaire (COP) ; c) azote particulaire(Npar) ; d) pigments totaux (PIG) ; classées par charge particulaire décroissante.

Percentages in: a) particulate inorganic carbon (CIP); b)particulate organic carbon (COP); c) particulate nitrogen (Npar); d) total pigment (PIG) ranked by decreasing particle concentration.

- Pour des concentrations en particules comprises entre 205 et 85 mg/l (niveaux 2, 3, 14 et 15, tab. 1), les teneurs en CIP et Npar augmentent fortement, alors que les taux de COP diminuent. Ainsi, l'augmentation des teneurs en COP qui, en général, est liée à la perte de charge, ne s'observe pas (Meybeck *et al.*, 1988). Corrélativement, le rapport COP/Npar décroît nettement (tab. 3), indiquant que le matériel organique est plus protéique en 137A qu'en 133A. Ce matériel vivant est vraisemblablement du plancton carbonaté, dans la mesure où il y a covariation des taux de CIP et de Npar. Autrement dit, des organismes carbonatés interviendraient dès le stade précoce de transfert des suspensions rhodaniennes en milieu marin. Sachant qu'en 137A les teneurs en pigments sont très basses (COP/PIG de 2043 et 2411), le schéma classique de développement du zooplancton par broutage de la production primaire superficielle ne peut expliquer, à lui seul, la diminution des teneurs en COP. Le «recyclage» du carbone concernerait donc une partie du flux de matière organique émis par le Rhône. Au cours de cette première phase de transfert, une partie du COP peut également sédimenter, soulignant le rôle de puits de carbone joué par les zones prodeltaïques (Wollast, 1991).

- Pour des concentrations particulaires comprises entre 65 et 30 mg/l (niveaux 5, 6, 10, 11, 12, 13, 19 et 21, tab. 1), les teneurs en CIP et Npar augmentent, moins fortement que précédemment, alors que les taux de COP demeurent constants. Corrélativement, les rapports COP/Npar tendent vers 7 (tab. 3), indiquant que le matériel organique est peu dégradé. Autrement dit, le «recyclage biologique» noté précédemment pourrait être évoqué à nouveau. Cependant, à ces stations où les temps de résidence des particules ont été un peu plus longs, un équilibre, qui conduit à une stabilisation des teneurs en COP, s'établit entre la production nouvellement induite, la consommation et la sédimentation du COP.

- Pour des concentrations particulaires comprises entre 26 et 20 mg/l (niveaux 9, 17, 18, 20 et 36, tab. 1), les processus changent dans la mesure où les teneurs en CIP et Npar demeurent sensiblement constantes, alors que les taux de COP s'accroissent. Corrélativement, les rapports COP/Npar augmentent, indiquant que le matériel organique est moins protéique que précédemment (tab. 3). Sachant que ce phénomène intéresse principalement les niveaux de fond (50 cm) des stations situées à l'est du Rhône (135A, 140C et 137B) ou au large (138A), on peut penser que des apports advectifs liés à la circulation liguro-provençale sont responsables de l'accroissement des teneurs en COP. En raison des taux élevés de CIP et des teneurs notables en Npar, une activité planctonique benthique résiduelle, liée à l'existence de remise en suspension (Mac Comb *et al.*, 1981), serait encore présente à ces niveaux.

- Pour des concentrations particulaires comprises entre 20 et 13 mg/l (niveaux 1, 22, 23, 24, 26 et 27, tab. 1), les teneurs en CIP sont à leur maximum, les taux de Npar fluctuent autour de 0,3 % et ceux de COP sont stables (2,3 %). C'est à partir de ces niveaux que les teneurs en pigments

deviennent notables (> 0,007 ‰), et principalement la chlorophylle *a* et ses dérivés. Cet apport de matériel organique frais n'augmente pas les teneurs en COP, qui marquent un «palier». Autrement dit, le «recyclage biologique» interviendrait à nouveau et la variabilité des rapports COP/Npar (tab. 3) refléterait l'intensité relative de la production et du broutage (Minas et Minas, 1989). On notera que ces apports d'origine phytoplanctonique concernent principalement les stations échantillonnées le 19 mai (139A et B) et situées au niveau des auréoles de production observées, en surface, durant la campagne.

- Pour des concentrations en particules inférieures à 12 mg/l (niveaux 4, 7, 8, 16, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34 et 35, tab. 1), les teneurs en CIP décroissent fortement, indiquant que l'importance du plancton carbonaté est moins grande. Les taux de COP augmentent notablement, et de grandes fluctuations sont enregistrées dans les teneurs en Npar et PIG, qui tendent à augmenter. La croissance des teneurs en COP et Npar n'est pas linéaire, et les rapports COP/Npar fluctuent en fonction de la variabilité des teneurs en pigments (fig. 12 *b*, 12 *c*, 12 *d*). La consommation immédiate du matériel phytoplanctonique par le zooplancton (Welschmeyer et Lorenzen, 1985) ou la présence de populations sénescentes (Gowen *et al.*, 1983) permettrait d'expliquer l'augmentation générale des rapports COP/Npar en fonction de la diminution de la charge (tab. 3). Cependant, une source de COP supplémentaire peut aussi être envisagée, et ce type de néphéloïde résulterait du mélange entre un matériel organique frais, issu de la production primaire superficielle, et un matériel organique très dégradé. Dans le cas de la station de l'embouchure, cette matière organique, d'origine continentale, proviendrait du Rhône ; dans le cas du néphéloïde côtier, elle serait d'origine marine et véhiculée par la dynamique liguro-provençale. Les teneurs élevées en COP peuvent être expliquées également par une diminution de la fraction minérale dans la composition générale du néphéloïde (Cauwet, 1990). Ceci peut être lié à une baisse des apports du Rhône en raison de la fin de la crue (140A), ou à la sédimentation des particules minérales plus denses, dans la mesure où les niveaux concernés par ce phénomène sont en général situés à 2 m au-dessus du fond, quelquefois à 1 m (135A, 140B, 140C).

CONCLUSIONS

Les différents états de néphéloïdes échantillonnés permettent de définir les caractéristiques générales du transfert du matériel particulaire, à l'embouchure d'un fleuve, dans une mer sans marée importante. Au cours de cette campagne, une approche des processus qui contrôlent l'évolution du matériel particulaire dans le néphéloïde benthique a pu être acquise. A partir de la prise en compte de l'environnement physique des prélèvements, d'une stratégie d'étude adaptée et de l'utilisation de moyens d'échantillonnage adéquats, des corrélations sont mises en évidence entre les mesures courantométriques, hydrologiques, la néphélométrie et les résultats de l'analyse des suspensions.

Le profil hydrologique du 17 mai montre le caractère impulsionnel du transfert du matériel rhodanien, car en l'espace de trois heures l'épaisseur du néphéloïde a été triplée, en liaison avec un apport particulaire lié à une variation de régime du Rhône. Le temps de résidence des particules fluviatiles de fond est relativement long par rapport à celui des suspensions superficielles car, si l'on considère que le profil hydrologique du 17 mai marque l'arrivée de matériel rhodanien sur le plateau continental, on peut estimer que le matériel particulaire de la petite crue, enregistrée le 13 mai à Beaucaire, a atteint 73 m de profondeur quatre jours plus tard. A proximité du fond, la vitesse du courant est faible à très faible. Cela permet la formation, par décantation, d'un gradient vertical de charge qui peut être rapidement perturbé. En effet, les données courantométriques indiquent qu'en l'espace d'une dizaine de minutes, des fluctuations de l'intensité de la dynamique assurent la dispersion des suspensions dans la colonne d'eau. Le néphéloïde benthique constitue une structure évolutive, dans l'espace et le temps, où les processus physiques (décantation, advection) et biologiques (production, broutage) contribuent à l'évolution du matériel particulaire. Cette évolution est rapide, car la station de l'embouchure, par exemple, a vu ses caractéristiques profondément modifiées en l'espace de sept jours. Au cours du transfert à l'interface continent-océan, le néphéloïde est le siège de processus qui l'enrichissent en CIP et en Npar tout en l'appauvrissant en COP. Cela peut être attribué à une colonisation du néphéloïde par du plancton carbonaté, qui apporte une fraction protéique notable et utilise une partie du flux de matière organique émis par le Rhône. Lorsque le temps de résidence des particules du néphéloïde augmente, un équilibre, qui conduit à une stabilisation des teneurs en COP, s'établit entre la production récemment induite et la consommation du COP. Dans le cas de néphéloïdes inférieurs à 1 m d'épaisseur, l'activité planctonique est localisée à proximité du fond, là où la charge particulaire est la plus élevée, et les relations de dépendance du COP en fonction du CIP (production, broutage) ne sont plus décelables à l'échelle de mesure mise en oeuvre. Les néphéloïdes à faible concentration en particules sont composés, à la fois, de matériel organique très dégradé, transporté par le Rhône ou le courant liguro-provençal, et de matériel frais, issu de la biomasse phytoplanctonique superficielle. Les teneurs en CIP montrent que l'influence du plancton carbonaté est faible par rapport à celle qui caractérise un néphéloïde moyennement chargé.

Le néphéloïde benthique, qui est le siège d'une utilisation rapide de l'azote et du carbone organique particulaire, constitue un milieu eutrophe capable d'être transféré, avec des constantes de temps très brèves, sur une superficie importante du plateau continental. Ainsi, le rôle de puits joué par les zones prodeltaïques serait susceptible de varier en fonction de la quantité de matériel particulaire transporté par cette voie de transfert, elle-même liée à la variabilité des conditions hydrodynamiques marines (tempête, ondes internes, circulation générale) et des conditions de débit fluviatile (crue, étiage).

Remerciements

Ces recherches ont été développées avec le soutien financier du Ministère de l'Environnement (contrat n° 88-305 «Dynamique et pollution du Rhône»). Les auteurs tiennent également à remercier l'équipage du navire océanographique *Georges Petit* et son capitaine J. Touzé, qui ont contribué au bon déroulement de la campagne à la mer, ainsi que le personnel de l'atelier du service général de l'Université de Perpignan et J. Carbone, qui ont permis la construction du système de prélèvement.

RÉFÉRENCES

Aloisi J.-C., J.-P. Cambon., J. Carbone, G. Cauwet., C. Millot, A. Monaco et H. Pauc. (1982). Origine et rôle du néphéloïde profond dans le transfert des particules au milieu marin. Application au golfe du Lion. *Oceanologica Acta*, **5**, 4, 481-491.

d'Anglejan B. et R.G. Ingram (1984). Near-bottom variations of turbidity in the St Lawrence estuary. *Estuar. coast. Shelf Sci.*, **19**, 655-672.

Armi L. et E. D'Asaro (1980). Flow of the benthic ocean. *J. geophys. Res.*, **85**, 469-484.

Bapst A. et C. Beck (1987). Structures néphéloïdes et thermiques sur le delta du Rhône. *Colloque international d'Océanologie: écosystème des marges continentales. Perpignan, CIESM*, 26.

Calmet D. et J.M. Fernandez (1990). Caesium distribution in northwest Mediterranean seawater suspended particles and sediments. *Continent. Shelf Res.*, **10**, 895-913.

Cauwet G. (1983). Distribution du carbone organique dissous et particulaire en Méditerranée nord-occidentale. *Rapp. P.-v. Réun. Commn int. Explor. scient. Mer médit.*, **28**, 101-105.

Cauwet G. (1990). Distribution of organic carbon in the Gulf of Lions: influence of Rhone inputs. Lions. CEC EROS 2000 Ser., J.-M. Martin and H. Barth, editors. Blanès, *Wat. Polut. Res. Rept*, **20**, 209-229.

Cauwet G., F. Gadel, M.M. de Souza Sierra, O. Donard et M. Ewald (1990). Contribution of the Rhône River to organic carbon inputs to the northwestern Mediterranean Sea. *Continent. Shelf Res.*, **10**, 1025-1037.

Coste B. (1974). Rôle des apports nutritifs minéraux rhodaniens sur la production organique des eaux du golfe du Lion. *Téthys*, **6**, 727-740.

Crépon M. (1969). Hydrodynamique marine en régime impulsionnel. 3ème partie: Océan à deux couches. *Cah. océanogr.*, **21**, 863-877.

Demarcq H. et L. Wald (1984). La dynamique superficielle du panache du Rhône d'après l'imagerie infrarouge satellitaire. *Oceanologica Acta*, **7**, 2, 159-162.

Deschamps P.-Y. (1977). Télédétection de la température de surface de la mer par radiométrie infrarouge. *Thèse Université de Lille, n° 376.*

Eisma D., P. Bernard, J.J. Boon, R. Van Grieken, J. Kalf et W.G. Mook (1985). Loss of particulate organic matter in estuaries as exemplified by the Ems and Gironde estuaries. in: Transport of carbon and minerals in major world rivers, E.T Degens., S. Kempe and R. Herrera, editors. *Mitt. geol.-paläont. Inst. Univ. Hamb.*, **58**, 397-412.

de la Giraudière I., P. Laborde et J.-C. Romano (1989). HPLC determinations of chlorophylls and break-down products in surface micro layers. *Mar. Chem.*, **26**, 189-204.

Goldman J.C. (1980). Physiological processes, nutrient availability and the concept of relative growth rate in the marine phytoplankton ecology. in: *Primary production in the sea*, P.G. Falkowski, editor. Plenum Publ. Corp., 179-193.

Gowen R.J., P. Tett et J.G.B. Wood (1983). Changes in the major dihydroporphyrin plankton pigments during the spring bloom of phytoplankton in two Scottish sea-lochs. *J. mar. biol. Ass. U.K.*, **63**, 27-36.

Grant W.D. et O.S. Madsen (1986). The continental-shelf bottom boundary layer. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **18**, 265-305.

Gross T.F. et A.J. Williams (1991). Characterization of deep-sea storms. *Mar. Geol.*, **99**, 281-301.

Heaps N.S. et J.E. Jones (1985). A three-layered spectral model with application to wind-induced motion in the presence of stratification and a bottom slope. *Continent. Shelf Res.*, **4**, 279-320.

Irion G. (1991). Minerals in rivers. in: *Biogeochemistry of major world rivers*, E.T. Degens, S. Kempe and J.E Richey, editors. SCOPE 42, John Wiley and sons, 265-281.

Ittekkot V. et R.W. Laane (1991). Fate of riverine particulate organic matter. in: *Biogeochemistry of major world rivers*, E.T.Degens, S. Kempe and J.E. Richey, editors. SCOPE 42, John Wiley and sons, 233-243.

Kempe S., M. Pettine et G. Cauwet (1991). Biogeochemistry of european rivers. in: *Biogeochemistry of major world rivers*, E.T Degens, S. Kempe and J.E. Richey, editors. SCOPE 42, John Wiley and sons, 169-211.

Kerambrun P. et K.H. Szekielda (1969). Dosage simultané du carbone, de l'hydrogène et de l'azote dans le matériel en suspension dans l'eau de mer. Note technique. *Téthys*, **1**, 581-584.

Lande R. et A.M. Wood (1987). Suspension times of particules in the upper ocean. *Deep-Sea Res.*, **34**, 61-72.

Leveau M. et B. Coste (1987). Impacts des apports rhodaniens sur le milieu pélagique du golfe du Lion. *Bull. ecol. Soc. Am.*, **18**, 119-122.

Lochet F. (1987). Étude de la structure frontale du Rhône grâce à la mesure en continu de descripteurs hydrobiologiques. *Colloque international d'Océanologie: Écosystème des marges continentales. Perpignan, CIESM*, 27.

Lochet F. et M. Leveau (1990). Transfers between an eutrophic ecosystem, the river Rhône, and an oligotrophic ecosystem, the northwestern Mediterranean Sea. *Hydrobiologia*, **207**, 95-103.

Mac Cave I.N. (1985). Mechanics of deposition of fine-grained sediments from nepheloid layers. *Geo-Marine Letts*, **4**, 243-245.

Mac Cave I.N. (1986). Local and global aspects of the bottom nepheloid layers in the world ocean. *Neth. J. Sea Res.*, **20**, 167-181.

Mac Comb A.J., R.P. Atkins, P.B. Birch, D.M. Gordon, R.J. Lukatelich (1981). Eutrophication in the Peel-Harvey Estuarine Sytem, Western Australia. in: *Estuaries and Nutrients*, B.J.Nielson and L.E. Cronin, editors. Humana Press, New Jersey, USA, 323-342.

Mantoura R.F.C. et C.A. Llewellyn (1983). The rapid determination of algal chlorophyll and carotenoïd pigments and their breakdown products in natural waters by reverse phase high performance liquid chromatography. *Analytica chim. Acta*, **151**, 297-314.

Margalef R. (1984). Le plancton de Méditerranée. *La Recherche*, **158**, 1082-1094.

Martin J.-M. et A.J. Thomas (1990). Origin, concentration and distribution of artificial radionuclides discharged to the Mediterranean Sea. *J. environ. Radioactivity*, **11**, 1 05-139.

Meybeck M., G. Cauwet, S. Dessery, M. Somville, D. Gouleau et G. Billen (1988). Nutrients (organic C,P,N,Si) in the eutrophic river Loire (France) and its estuary. *Estuar. coast. shelf Sci.*, **27**, 595-62 4.

Millot C. (1990). The Gulf of Lions' hydrodynamics. *Continent. Shelf Res.*, **10**, 885-894.

Millot C. et L. Wald (1980). The effect of the Mistral wind on the Ligurian current near Provence. *Oceanologica Acta*, **3**, 4, 399-402.

Millot C. et M. Crépon (1981). Inertial oscillations on the continental shelf of the Gulf of Lions. Observations and theory. *J. phys. Oceanogr.*, **5**, 639-657.

Minas M. et H.J. Minas (1989). Primary production in the Gulf of Lions with considerations to the Rhone river inputs. CEC EROS 2000 Ser., J.-M. Martin and H. Bart, editors. Paris, *Wat. Pollut. Res. Rept*, **13**, 112-125.

Monaco A., G. Cauwet, B. Deniaux, J.-M. Fernandez, F. Fernex, F. Gadel, F. Lochet, J. Marchand, J.-J. Naudin, F. Nyffeler et H. Pauc (1988). Dynamique et pollution du Rhône. Rapport Ministère de l'Environnement n° 86083, 50 pp.

Mook W.G. et F.C. Tan (1991). Stable carbon isotopes in rivers and estuaries. in: *Biogeochemistry of major world rivers*, E.T.Degens, S. Kempe and J.E. Richey, editors. SCOPE 42, John Wiley and sons, 245-264.

Morel A. (1989). Production primaire océanique, flux de carbone et particules. in: Océanologie, actualité et prospective, M. Denis, editor. Centre d'Océanologie de Marseille. 309-337.

Morel A., A. Bricaud, J.-M. André et J. Pelaez-Hudlet (1990). Spatial/temporal evolution of the Rhône plume as seen by CZCS imagery. Consequences upon the primary production in the gulf of Lions. CEC EROS 2000 Ser., J.-M. Martin and H. Barth, editors. Blanès, *Wat. Pollut. Res. Rept*, **20**, 45-62.

Nyffeler F. et J.-C. Godet (1986). The structural parameters of the benthic nepheloïd layer in the northeast Atlantic. *Deep-Sea Res.*, **33**, 195-207.

Pauc H. (1989). L'intrusion saline et la dynamique des matériaux en suspension au contact fluvio-marin: régime de crue et régime d'étiage dans l'oued Mazafran (ouest algérois). *Mar. Geol.*, **87**, 95-102.

Pont D. (1992). Caractérisation de la charge solide en suspension du Rhône au niveau du palier d'Arles lors d'une crue d'importance moyenne. Rapport Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse. 25 pp.

Redfield A.C., B.H. Ketchum et F.A. Richards (1963). The influence of organisms on the composition of sea water. in: *The Sea*, M.N. Hill, editor. Interscience, New York, USA, 26-77.

Richards K.J. (1990) Physical processes in the benthic boundary layer. *Phil. Trans. R. Soc.*, **331**, 3-13.

Sahl L.E., W.J. Merrell, D.W. Mac Grail et J.A. Webb (1987). Transport of mud on continental shelves: evidence from the Texas shelf. *Mar. Geol.*, **76**, 33-43.

Welschmeyer N.A. et C.J. Lorenzen (1985). Chlorophyll budgets: zooplankton grazing and phytoplankton growth in a temperate fjord and the central Pacific gyres. *Limnol. Oceanogr.*, **30**, 1-21.

Williams P.J. leB. et C. Robinson (1990). Seasonal differencies in the control of productivity in the Rhone outfall region of the Gulf of Lions. CEC EROS 2000 Ser., J.-M. Martin and H. Barth, editors. Blanès, *Wat. Pollut. Res. Rept*, **20**, 9-23.

Wollast R. (1991). The coastal organic carbon cycle: fluxes, sources and sinks. in: *Ocean Margin Processes in Global Change*, R.F.C. Mantoura, J.-M. Martin and R. Wollast, editors. John Wiley and Sons Ltd. 365-381.

Woodward E.M.S, N.J.P. Owens, A.P. Rees et C.S. Law (1990). A seasonal survey of nutrient cycling and primary production in the gulf of Lions, during 1988 and 1989. CEC EROS 2000 Ser., J.-M. Martin and H. Barth, editors. Blanès, *Wat. Pollut. Res. Rept*, **20**, 83-91.