

Origine et rôle du néphéloïde profond dans le transfert des particules au milieu marin. Application au Golfe du Lion

Néphéloïde
Matière en suspension
Flocculation
Carbone organique
Méditerranée

Nepheloid layer
Suspended matter
Flocculation
Organic carbon
Mediterranean Sea

J.C. Aloïsi^a, J.P. Cambon^a, J. Carbonne^a, G. Cauwet^a, C. Millot^b, A. Monaco^a, H. Pauc^c

^a Laboratoire de Sédimentologie et Géochimie marines, Université de Perpignan, Avenue de Villeneuve, 66025 Perpignan cedex.

^b Antenne du Laboratoire d'Océanographie physique du Muséum National d'Histoire Naturelle, Zone portuaire de Brégaillon, 83501 La Seyne-sur-Mer cedex.

^c Université d'Alger, Dar el Beida, Algérie.

Reçu le 11/2/82, révisé le 14/5/82, accepté le 8/6/82.

RÉSUMÉ

L'étude est basée sur la confrontation d'observations et analyses faites sur la répartition de la charge solide en suspension dans les eaux fluviales et marines (mesures de turbidité sériées) et sur les propriétés granulométriques, minéralogiques, chimiques et morphologiques des particules.

Dans les milieux stratifiés, chenaux et embouchures, le comportement de la matière en suspension est lié aux propriétés (salinité, température, dynamique) des différentes couches d'eau.

Dans le Golfe du Lion et en d'autres sites de la Méditerranée, on note une répartition multicouche de la charge terrigène et organogène concentrée surtout dans une couche néphéloïde près du fond. Cette couche se constitue dès le chenal fluvial à l'interface eaux douces/eaux salées. Dans les grandes embouchures comme celle du Rhône, elle est en continuité avec le néphéloïde benthique du plateau continental et est canalisée vers les canyons sous-marins.

Ces recherches montrent que dans les conditions d'observation, le phénomène de flocculation électrochimique et organominérale joue un rôle important dans la constitution du néphéloïde de fond, mais cela n'exclut pas la remobilisation d'une couche fluide de vase toujours présente dans les prodeltas, surtout en l'absence de la thermocline.

Ce schéma permet d'éclairer le mécanisme sédimentaire :

- sur le plateau où l'unité sédimentaire récente a la même géométrie en prisme que le néphéloïde benthique essentiellement soumis aux courants généraux;
- dans le bassin où la canalisation par le canyon de ce néphéloïde pourrait assurer un apport de matière.

Oceanol. Acta, 1982, 5, 4, 481-491.

ABSTRACT

Origin and role of the bottom nepheloid layer in the transfer of particles into the marine environment. Application to the Gulf of Lions.

This study is based on observations and analyses of suspended loads in riverine and marine waters and on the grain size, mineralogy, morphology and chemical composition of particles.

In stratified areas, the behaviour of suspended matter is correlated with physical properties of the different water layers.

In the Gulf of Lions, and other parts of Mediterranean Sea, a multilayered structure exists, with an important bottom nepheloid layer. This layer is formed in the river channel at the fresh/salt water interface. In the large river mouths, it is continuous with the benthic nepheloid layer of the continental margin and is channelled in the submarine canyons.

The electrochemical flocculation phenomenon plays an important role in the formation of this nepheloid layer, but this does not exclude the resuspension of previously sedimented fine particles, especially when there is no thermocline.

This picture permits the demonstration of the sedimentary mechanism :

- on the continental margin, where the recent sedimentary unit has the same prismatic shape as the benthic nepheloid layer;
- in the basin where the channeling of this turbid body by the canyons can be an important transport mechanism of solid material.

Oceanol. Acta, 1982, 5, 4, 481-491.

INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie la matière en suspension a retenu l'attention de nombreux océanographes et sédimentologistes (Ewing, Thorndike, 1965; Manheim *et al.*, 1970; Biscaye, Eitrem, 1974; Milliman *et al.*, 1975; Feely *et al.*, 1979). Divers auteurs prennent en compte l'incidence de facteurs hydrologiques (Harlett, Kulm, 1973; Drake, 1976), hydrodynamiques (Gibbs, 1974) et biologiques (Meade, 1972).

Si la présence d'une couche néphéloïde profonde est surtout attestée dans les domaines bathyal et abyssal, son origine et notamment sa relation avec les structures turbides des plateaux continentaux et embouchures sont discutées (Mc Cave, 1972).

En Méditerranée, les études sur la matière en suspension sont rares ou trop générales (Emelyanov, Shimkus, 1972; Nelson, 1972) pour corréliser ces informations ponctuelles avec la résultante sédimentaire. Les autres données sur la dispersion du matériel terrigène sont tirées des propriétés du sédiment (Chamley, 1971; Venkatarathnam *et al.*, 1972; Maldonado, Stanley, 1978).

En Méditerranée nord-occidentale et en particulier dans le golfe du Lion, on a utilisé principalement les traceurs naturels (minéraux argileux, radioisotopes ^{40}K , ^{232}Th) et artificiels (^{137}Cs , pesticides, hydrocarbures) (Got, Pauc, 1970; Monaco, 1971; Arnoux, Chamley, 1974; Aloïsi, Monaco, 1975; Aloïsi *et al.*, 1976).

Au cours de recherches récentes et après les travaux de Pauc (1970) au large du delta du Rhône, nous avons pu mettre en évidence l'existence d'une stratification de la matière en suspension et sa relation avec les structures hydrologiques et hydrodynamiques et surtout l'importance de la couche turbide profonde (Aloïsi *et al.*, 1979).

Le présent travail traite plus précisément des propriétés granulométriques, minéralogiques et chimiques des suspensions et tente de reconstituer le mécanisme de formation des couches néphéloïdes à partir d'observations et analyses effectuées dans les chenaux, les embouchures et le domaine marin au large du Rhône et de petits émissaires du Languedoc (Aude, Hérault, Port-La-Nouvelle; fig. 1).

Ces résultats préfigurent les recherches actuellement menées sur l'embouchure de l'Èbre et le plateau catalan et permettent de définir le mécanisme d'alimentation des marges continentales à partir des embouchures stratifiées des mers sans marées.

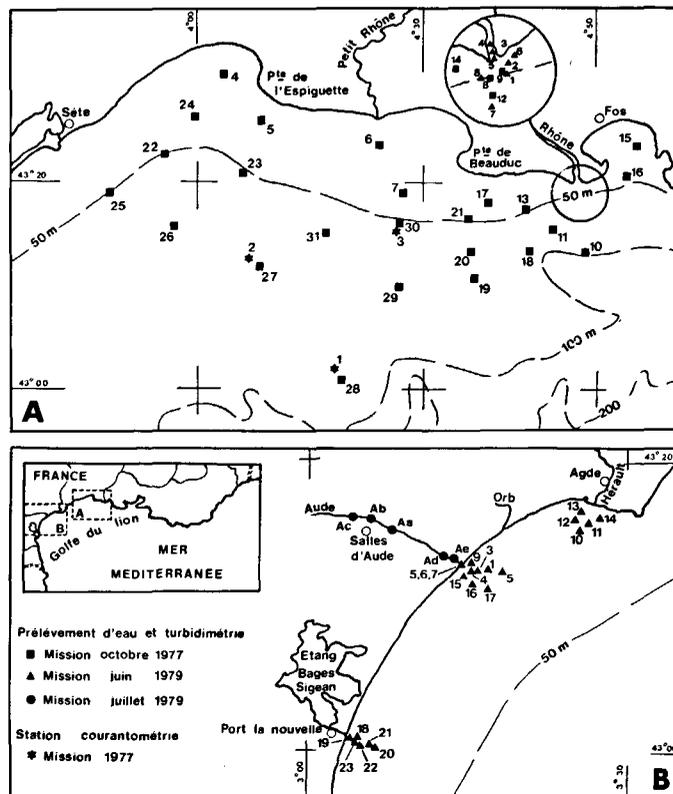


Figure 1
Sites d'étude dans les rivières et embouchures du Golfe du Lion au cours des missions 1977 et 1979 : Rhône, Hérault, Aude et Port-La-Nouvelle.

Gulf of Lions rivers and river mouth sites (cruises 1977-1979).

MÉTHODES D'ÉTUDES

Périodes d'observation

Après les premiers travaux effectués au large de la rivière Aude (Aloïsi *et al.*, 1975), une mission a eu lieu en octobre 1977 entre le Rhône et Sète à bord du N/O « Catherine-Laurence ». Elle a permis, sur 31 stations réparties sur tout le Golfe, de relever des profils verticaux de turbidité et de température et de prélever des échantillons à divers niveaux de la masse d'eau. Dans la même région, de juin à septembre 1977, le Laboratoire d'Océanographie Physique du Muséum a obtenu en deux points (fig. 1) des mesures de courant (à 10 m de la surface et à 5 m du fond) et de température avec des chaînes de thermistances (immersions intermédiaires; Millot, Lamy, 1978).

En juin 1979, une mission complémentaire du N/O « Catherine-Laurence » a permis d'explorer la zone infralittorale face aux débouchés de l'Aude, de l'Hérault et du Grau de La Nouvelle. En zodiac, nous avons remonté les embouchures du Rhône et de l'Aude (Grau de Vendres) afin d'y étudier la répartition verticale des turbidités, des températures et des salinités.

Enfin, en juillet 1979, en période d'étiage, nous avons remonté l'embouchure de l'Aude jusqu'en amont du coin salé pour étudier la perturbation dynamique et chimique provoquée par l'intrusion saline.

Mesures *in situ*

Paramètres hydrologiques

La structure hydrologique revêt une importance capitale dans la sédimentation et la dynamique de la suspension. Cette structure aurait pu être correctement représentée par le profil vertical de la densité si nous avions obtenu (à l'aide d'une bathysonde par exemple) des mesures fines et simultanées des paramètres température, salinité et pression. Mais la technique instrumentale employée (bathythermographes puis prélèvements par bouteilles pour déterminer la salinité) n'a pas permis une définition précise de profils verticaux de densité.

Néphélogéométrie

On a utilisé un transmissomètre de marque Hydrobios type Sauberer dont les cellules, sauf exception, étaient écartées de 50 cm. Ce matériel a permis d'obtenir des enregistrements en continu à la verticale de plus de soixante stations (fig. 1).

En surface et au fond, à la fois pour contrôler la réponse du turbidimètre et pour obtenir des échantillons à analyser après filtration, nous avons effectué des prélèvements d'eau au moyen de bouteilles Niskin de 30 l. Leur filtration (1 à 13 l) a eu lieu immédiatement à bord des navires, sur filtres Nucléopore de $0,45 \mu\text{m}$ pour l'évaluation de la charge solide, sur filtres Millipore $0,45 \mu\text{m}$ pour l'analyse des métaux lourds et sur filtres Whatman en fibres de verre pour l'analyse du carbone.

Études en laboratoire

Analyse des eaux

Les cations majeurs des eaux ont été analysés soit par spectrométrie de flamme (Na^+ , K^+) soit par absorption atomique (Ca^{2+} , Mg^{2+}). Les chlorures ont été dosés par argentimétrie et les métaux lourds (cuivre, zinc, plomb et cadmium) par polarographie.

Analyse des matériaux en suspension recueillis sur filtre

— la teneur pondérale en suspension a été mesurée par pesée à sec des filtres Nucléopore dessalés à l'eau distillée;

— à partir de l'observation au MEB des matériaux recueillis sur filtre Millipore, on a évalué la taille des flocons les plus gros de chaque échantillon ainsi que la répartition de taille des grains minéraux. Cette observation permet également une analyse de la structure fine des suspensoïdes;

— la nature minéralogique des matériaux en suspension a été étudiée par diffractométrie des rayons X, et leur teneur en carbone organique par combustion des filtres Whatman en fibre de verre (four à induction et analyseur LECO);

— après minéralisation complète, on a enfin dosé, par polarographie, les teneurs en métaux lourds (cuivre, zinc, cadmium et plomb), de la même façon que pour les eaux.

NATURE ET STRUCTURE DE LA MATIÈRE EN SUSPENSION DANS LE SYSTÈME RHODANIEN

Le coin salé et le système stratifié du Rhône

Dans la partie amont du coin salé, la turbidité est à peu près uniforme sur toute la hauteur d'eau. Vers l'aval, le coin salé est caractérisé par une couche supérieure, douce et relativement turbide, et une couche inférieure très turbide dont la salinité est de l'ordre de 35 ‰ (fig. 2, R4 et R3). En R4, la halocline est située à une profondeur d'environ 2 m, mais vers l'aval, la nappe de

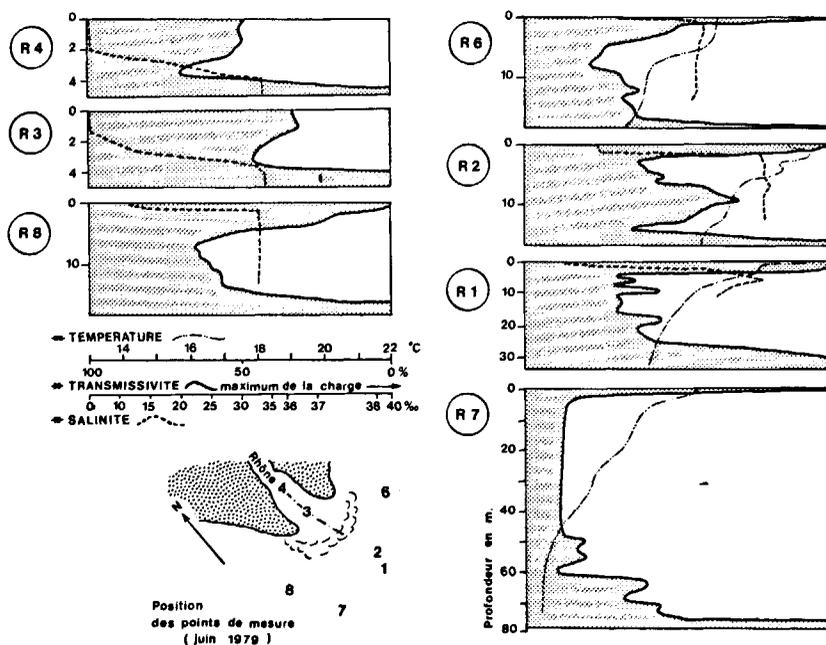


Figure 2

Relation entre la structure turbide et les propriétés hydrologiques dans le chenal et à l'embouchure du Rhône (juin 1979).

Relation between turbidity and water characteristics in the Rhone channel and mouth (June 1979).

surface dessalée (10 à 15 ‰) s'amincit rapidement pour devenir pelliculaire à quelques milles de l'embouchure; la couche néphéloïde de fond garde une épaisseur de l'ordre de 1 m.

A l'embouchure la stratification turbide se maintient et se complique plus ou moins en fonction de la stratification hydrologique. Schématiquement, la charge turbide se répartit en deux couches principales, superficielle et profonde, et en couches intermédiaires plus réduites et labiles. La couche superficielle (~ 17 mg/l) est souvent centimétrique et liée à la couche dessalée; le « néphéloïde » au contact du fond paraît s'épaissir aux dépens des couches lenticulaires intermédiaires plus soumises au gradient thermique (fig. 2, R1, R2, R6, R7). Donc, le système stratifié est présent même en période d'étiage (juin 1979) et s'élabore dès le chenal avec l'intrusion du coin salé.

Le matériel en suspension dans le domaine marin soumis au Rhône

Structure de la matière en suspension

En octobre 1977, l'homogénéisation des eaux superficielles a entraîné une réduction de l'écart de température entre la couche de surface (~ 15°C) et la couche profonde (~ 15°C), mais la thermocline saisonnière (~ 16 à 18°C) reste relativement bien marquée. Les conditions météorologiques ont évolué d'un régime NNW à un régime de SE, entraînant des variations d'immersion de la thermocline plus ou moins importantes (phénomènes d'up- et down-welling). Cependant, la thermocline présente généralement une pente ascendante vers la côte : son immersion est de ~ 40 m au large et de ~ 25 m vers la côte (Millot, 1979). Les vitesses moyennes observées dans cette région en automne sont de l'ordre de ~ 25 cm/s dans la couche de surface

et ≤ 10 cm/s dans la couche profonde vers le secteur ouest (Aloïsi *et al.*, 1979).

En octobre 1977 la répartition spatiale des matériaux en suspension était la suivante (fig. 3) :

- la tache turbide superficielle du Rhône, dont le débit est, en cette période, faible (1 000 à 2 000 m³/s), s'étale jusqu'à 5 milles vers le Sud-Ouest. Cette structure est induite par la couche d'eau de surface dessalée dont la turbidité décroît depuis l'embouchure (17 mg/l) vers le large (0,5 mg/l) avec une teneur moyenne de l'ordre de 1 mg/l;

- la couche néphéloïde au contact du fond se manifeste dès l'embouchure du Rhône; dans les petits fonds sa charge dépasse 5 mg/l et son épaisseur 20 mètres; elle passe très vite sous la thermocline et s'étale vers le large sur le plateau et les canyons. Cette couche est elle-même stratifiée en plusieurs niveaux de charge croissante vers le fond;

- des couches turbides secondaires apparaissent près de l'embouchure; épaisses de quelques mètres, elles paraissent issues de la couche turbide superficielle et pourraient être construites par le « dépôt » d'une partie de la suspension organo-minérale à des immersions où le gradient vertical de densité est relativement élevé. Devant le Petit-Rhône, on observe une structure identique, mais moins marquée, en rapport avec la moindre importance de cet émissaire.

Nature et composition du matériel en suspension

Évolution de la taille des suspensoïdes

L'étude de l'évolution de la taille des suspensoïdes depuis l'embouchure vers le large permet de mettre en évidence la résultante de l'interaction des phénomènes de floculation, de sédimentation et de turbulence des eaux (Pauc, 1977).

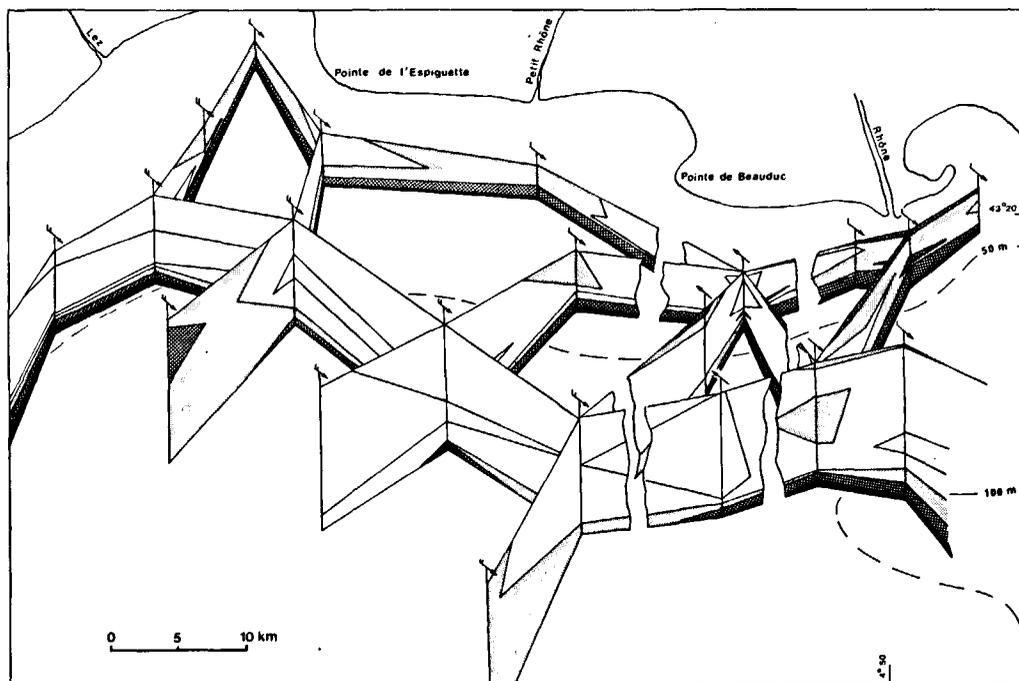


Figure 3

Mesures de turbidité en octobre 1977, montrant l'extension du néphéloïde profond à partir des embouchures et la faible importance de la couche turbide superficielle issue du Rhône.

Spatial distribution of suspended matter in October 1977, showing the bottom nepheloid layer and the minor development of the plume.

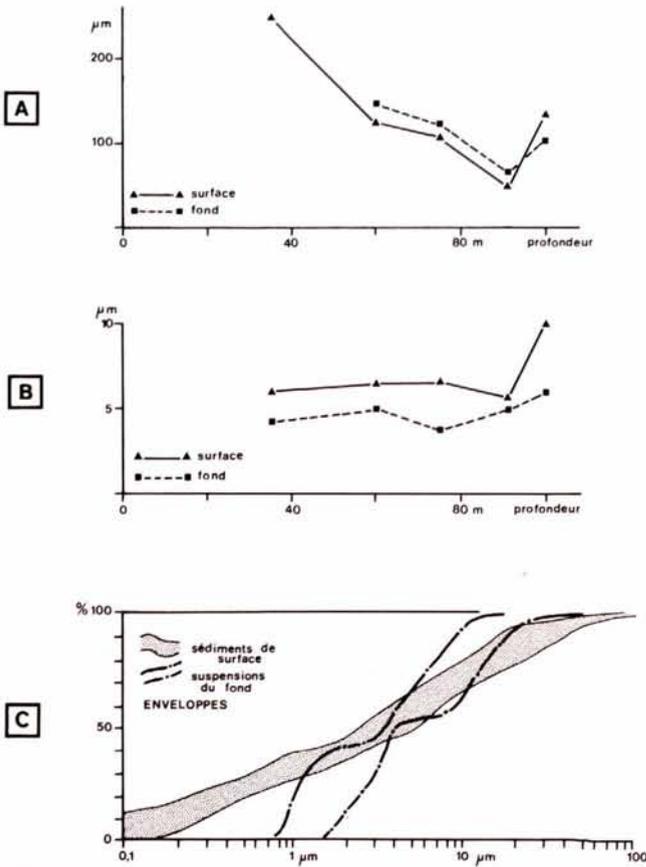


Figure 4
 Granulométries des suspensioïdes et grains minéraux du secteur rhodanien. Évolution avec la profondeur et comparaison avec la pellicule superficielle des sédiments.
 A - Évolution de la taille maximum des suspensioïdes avec la profondeur, dans les couches turbides superficielle et profonde;
 B - Évolution de la taille moyenne des grains minéraux avec la profondeur;
 C - Comparaison entre la granulométrie des grains en suspension (par microscopie) et des dépôts superficiels (par sédimentométrie).
Size of the suspended matter and mineral grains of Rhone region. Evolution with depth and comparison against surface film layer of sediment.
 A - Evolution of the maximum size versus depth for the surface and bottom layers;
 B - Mean size of minerals versus depth;
 C - Granulometric comparison of suspensates and superficial sediments.

Près de la surface, la taille maximum des suspensioïdes diminue depuis l'embouchure vers le large, de 250 à 50 μm (fig. 4A) mais augmente sensiblement vers la tête du canyon du Rhône (130 μm).

Près du fond, dans la couche néphéloïde, l'évolution de la taille des suspensioïdes est parallèle à celle observée en surface avec toutefois des dimensions légèrement supérieures de 10 à 20 μm sauf en tête de canyon où les suspensioïdes du fond sont plus petits que ceux de la surface (~ 100 μm).

Taille des grains minéraux en suspension. Comparaison avec la granulométrie des sédiments

La taille moyenne des grains minéraux constitutifs des suspensioïdes varie très peu du Rhône vers le large. Elle reste voisine de 7 μm en surface et de 5 à 6 μm dans la couche néphéloïde profonde. Toutefois, en tête du canyon on relève des dimensions moyennes légèrement plus élevées : 11 μm en surface et 7 μm au fond (fig. 4B). De même, la taille des plus gros grains trans-

portés (toujours inférieure à 40 μm) est dans la couche turbide superficielle plus élevée (de 23 à 36 μm) que dans la couche néphéloïde profonde (15 à 28 μm). Cette évolution est à rapprocher du fait que les courants sont généralement plus forts en surface qu'au fond.

Sur la figure 4C on compare les répartitions granulométriques des grains en suspension dans la couche néphéloïde profonde et celles des matériaux constitutifs du fond. On note un meilleur classement des particules en suspension pour des valeurs de la médiane proches (2 à 6 μm) et sensiblement comparables à celles données par Brun-Cottan (1971). La distribution aléatoire des grains les plus petits et les plus gros du sédiment est liée aux variations de turbulence.

Dans le détail, on observe une bimodalité très nette dans la répartition granulométrique du matériel en suspension près du fond en tête du canyon, due peut-être à une remobilisation des dépôts. Dans des fonds relativement faibles (~ 30 m), la suspension s'enrichit en éléments un peu plus grossiers (silts) issus du littoral.

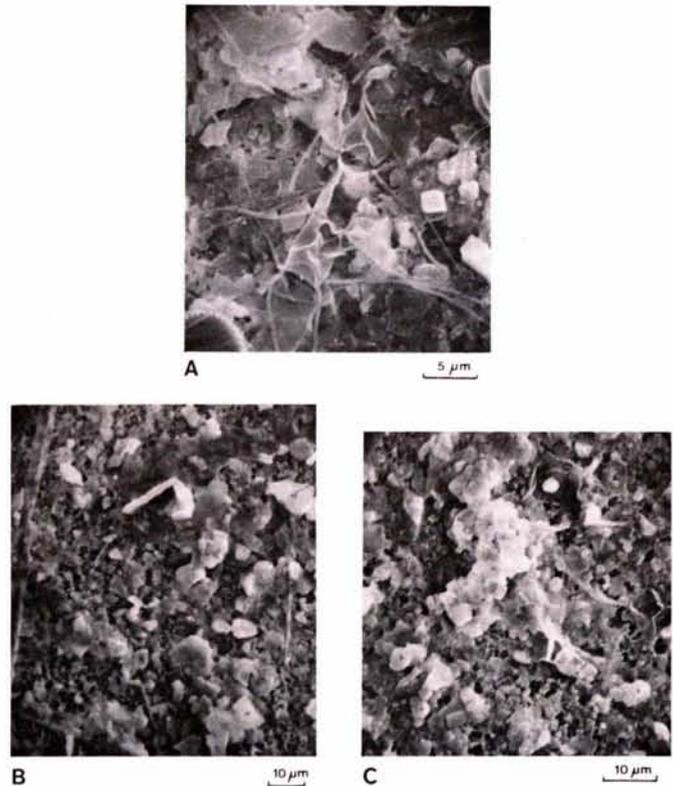


Figure 5
 Microstructures de la matière en suspension au large du Rhône (observations effectuées au microscope électronique à balayage).
 A : Vue générale montrant l'importance des suspensioïdes organo-minéraux dans la couche turbide superficielle;
 B : Vue générale de la matière en suspension dans les couches turbides intermédiaires (- 35 m); remarquer l'abondance de la phase organique, fibres et films;
 C : Matière en suspension dans le néphéloïde benthique (- 85 m) : suspensioïde formé par agglomération de « faecal pellet », prolongé par des agrégats argileux.
Microstructures of suspended matter off the River Rhone (observations by scanning electron microscope).
 A : Appearance of the plume suspensates showing the importance of organo-mineral components;
 B : Appearance of intermediate layer suspensates (- 35 m); note the frequency of organic components (fibres and films);
 C : Suspended matter in the benthic nepheloid layer (- 85 m) : suspensate built by aggregation of faecal pellets and clay mineral aggregates.

Composition du matériel en suspension

L'aspect du matériel en suspension est différent selon qu'il est prélevé dans la nappe de surface, dans la couche néphéloïde profonde ou dans la masse d'eau intermédiaire. Nous avons déjà présenté l'étude microstructurale et attiré l'attention sur le phénomène d'agglomération surtout organique (Aloïsi *et al.*, 1979). De manière moins systématique que Zabawa (1978), nous avons distingué la pellétisation, les trames et films organiques (origine microbienne?) et les réseaux phytoplanctoniques.

La suspension de surface est constituée de structures complexes, le plus souvent de grande taille où la phase organique phytoplanctonique joue un rôle primordial (fig. 5A).

Près du fond où la charge solide est en général plus élevée qu'en surface, les structures deviennent peu nettes, surtout près de l'embouchure. La participation du matériel organique devient plus discrète et se limite à la présence de quelques diatomées, débris d'algues unicellulaires et nannoplancton. L'agglomération se fait par « pelletization » qui intéresse des particules silto-argileuses (fig. 5C).

Très souvent, les grandes structures complexes paraissent composées par l'assemblage de flocons plus petits organominéraux de 10 à 20 μm , ce qu'on peut rapprocher des observations de Y. Morel (1971). Au large, la suspension est composée presque uniquement d'aggrégats.

Dans la masse d'eau intermédiaire, l'aspect structural des suspensoides est proche de celui des matériaux de surface, mais avec une charge solide moins élevée et une participation organique plus marquée (fig. 5 B).

Propriétés chimiques

Carbone organique particulaire

Le carbone organique particulaire a été dosé sur un certain nombre de stations au large de l'embouchure du Rhône (fig. 6). Dans la couche superficielle, la teneur est croissante vers le large : 0,5 à 2,2 %. De l'embouchure, où la charge turbide atteint 32 mg/l, jusqu'à un mille de la côte (20 mg/l), on passe de 0,12 mg COP/l à 0,48 mg/l. Ceci confirme qu'il n'y a pas un tri favorable aux particules organiques mais un enrichissement global véritable, lié à la productivité marine.

Dans le néphéloïde profond, les teneurs en carbone organique sont en général plus élevées (~ 4 % et jusqu'à 7,5 %) avec un maximum dans la zone infralittorale, au niveau du prodelta (- 30 à - 50 m). Elles sont probablement dues à une préservation du matériel organique dans des conditions plus réductrices favorisées par la charge turbide et l'atténuation de la turbulence sous la thermocline. Dans les niveaux intermédiaires la teneur est variable et en relation inverse de la charge solide.

On peut dire que les suspensions apportées par le Rhône sont relativement pauvres en matière organique, mais le mélange des eaux douces et salées crée une zone de forte productivité; la matière ainsi produite alimente le néphéloïde en formation.

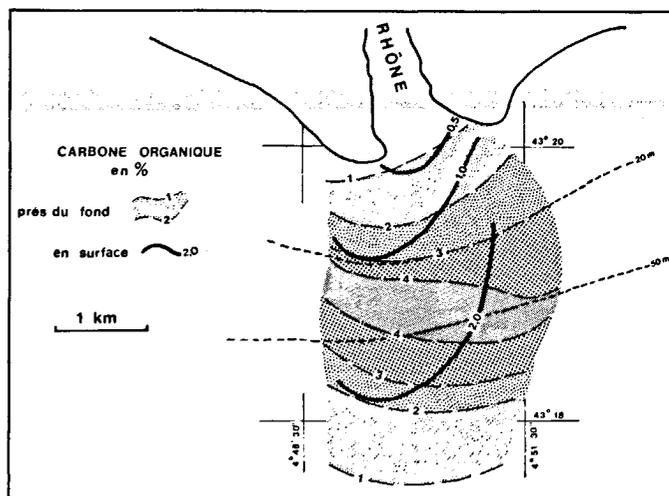


Figure 6

Répartition du carbone organique particulaire dans la couche turbide de surface et dans le néphéloïde profond au large du Rhône.

Suspended particulate organic carbon distribution in the surface layer and in the bottom nepheloid layer off the River Rhone.

C'est cette double contribution, terrigène et thalassogène, qui assure un taux de carbone organique élevé aux sédiments prodeltaïques (Aloïsi *et al.*, 1976).

Les métaux lourds

Le plomb, le zinc, le cuivre et le cadmium ont été dosés dans les eaux et les suspensions à plusieurs niveaux de la tranche d'eau et dans les premiers dix centimètres des dépôts, sur quelques stations au large du Rhône.

En règle générale ces métaux sont plus fortement concentrés dans la tranche d'eau superficielle que dans la couche au contact du fond; le facteur d'enrichissement est de 4 à 8 pour le Zn et le Pb et jusqu'à 20 pour le Cu à la station la plus proche du Rhône.

Les quatre métaux sont en moyenne 3 fois plus concentrés dans la matière en suspension que dans le sédiment (fig. 7). Pour le cadmium le facteur d'enrichissement atteint 10; il s'accroît de la côte vers le large pour le cuivre et le plomb, montrant une association privilégiée avec la matière organique et un hiatus à l'interface entre la suspension fraîchement constituée et le sédiment oxydé à ces profondeurs, au-delà de 50 m. La distribution verticale des éléments est parallèle à celle de la charge solide, les couches turbides superficielles et profondes étant plus riches en métaux, surtout dans le domaine prodeltaïque; plus au large, l'homogénéisation reflète l'identité de constitution telle que le montrent les observations microscopiques. Ceci confirme le double mécanisme de transfert particulaire, en surface et par le fond.

Pour les quatre éléments et quelle que soit leur forme (dissoute ou particulaire), l'ordre des concentrations reste $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$. Le transfert de la côte vers le large s'effectue surtout en surface pour les formes dissoutes de certains éléments (Pb^{2+} , Cu^{2+}), mais la distribution verticale simule en général un système bicouche. Au niveau des formes dissoutes la récurrence au fond pourrait être due à une remobilisation telle que l'envisagent Martin et Meybeck (1979) à l'interface eau-sédiment.

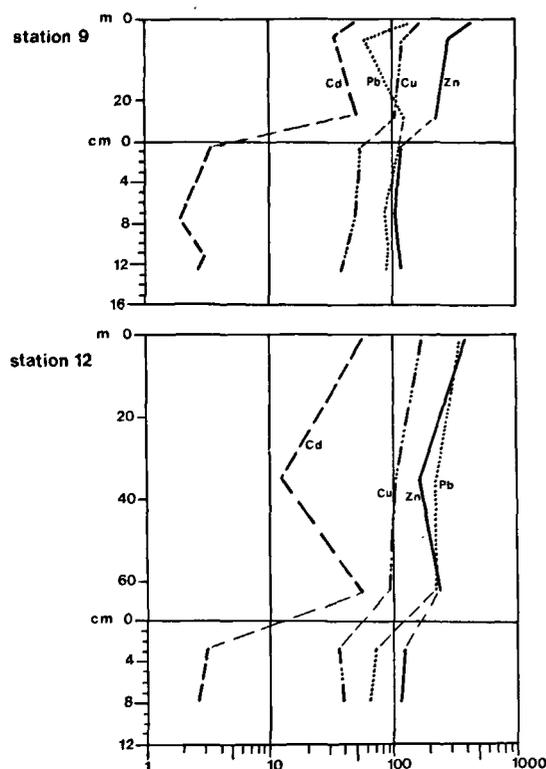


Figure 7
Teneur en métaux lourds dans la matière en suspension et dans les premiers centimètres du sédiment, dans 2 stations situées au large de l'embouchure du Rhône (octobre 1977).

Heavy metal concentrations in the suspended matter and the first centimetres of sediment in 2 sites off the River Rhone (October 1977).

Conclusion

On sait que le Rhône provoque en Méditerranée nord-occidentale une importante dessalure de surface (Fieux, 1972) dont l'extension vers l'Ouest reste perceptible jusqu'au large du Roussillon (Boutière *et al.*, 1974). En conséquence, il paraissait logique de faire dériver l'essentiel de l'alimentation terrigène du Golfe du Lion et en particulier des vases circalittorales, du dépôt des alluvions rhodaniennes après un parcours plus ou moins long des particules en surface.

Toutes les observations effectuées en mer dans l'aire d'influence du Rhône à différentes périodes et encore récemment (juin 1981) attestent la présence d'un néphéloïde profond que de nombreux auteurs rattachent à une remobilisation du sédiment par les courants ou par l'activité biologique (Meade, 1972). Les analyses qualitatives et quantitatives, de même que les observations en amont de l'embouchure paraissent indiquer la constitution précoce du néphéloïde profond dès le chenal et l'intervention des phénomènes physico-chimiques de floculation, tels qu'ils sont envisagés à partir d'expérimentations (Whitehouse *et al.*, 1960; Migniot, 1968; Pauc, 1980) ou d'études *in situ* (Krone, 1962; Aloïsi *et al.*, 1975; 1979; Yamamoto, 1979).

Dans le cas du Rhône il y a pratiquement transfert direct des particules au sein du néphéloïde profond par l'intermédiaire du chenal majeur du delta sous-marin; leur dispersion est assurée par les courants généraux et modulée par la morphologie (Aloïsi *et al.*, 1979). Dans ces conditions et compte tenu de l'hétérogénéité de la matière particulaire (nature, taille, forme, densité) et de

la stratification des eaux, toute appréciation du phénomène sédimentaire par l'intermédiaire de paramètres tels que la vitesse de chute des particules est illusoire.

NATURE ET STRUCTURE DE LA MATIÈRE EN SUSPENSION ISSUE DES AUTRES RIVIÈRES CÔTIÈRES

L'embouchure de l'Aude a fait l'objet des premières observations sur la matière en suspension en domaine marin ouvert (Aloïsi *et al.*, 1975). En effet, elle est marquée par la présence d'un prodelta parfaitement défini où se concentrent les produits argileux les plus fins (smectite) et des éléments chimiques naturels ou d'origine anthropique (Monaco, 1977). Des profils de turbidité et l'étude des prélèvements effectués en 1974 dans l'aire de l'envasement précoce permettent d'avancer l'hypothèse d'une alimentation par floculation électrochimique.

D'autres mesures ont été entreprises en juin et juillet 1979 sur ce même site, dans le chenal de l'Aude et par comparaison au large de l'Hérault et du Grau de La Nouvelle.

Basse vallée de l'Aude

Structure et propriétés chimiques du coin salé

Le front de salinité constitue un plan incliné qui, à la période d'observation (juillet 1979), débutait à la station Ab (fig. 8).

La composition ionique des eaux (fig. 9) montre que le milieu fluvial est encore « pur » à la station amont (Ac) et sur toute la hauteur d'eau. Dans ce cas l'ion Ca^{2+} domine la composition ionique.

Juste en amont du front de salinité et en surface de la station Ab, il existe une zone de mélange des caractéristiques ioniques, fluvial et marine : Mg^{2+} et Ca^{2+} ont des concentrations équivalentes, Na^+ et Cl^- sont du même ordre de grandeur et légèrement plus élevées que le Ca^{2+} .

Dans le front de salinité (stations Ab-fond et Aa-surface), la tendance marine est nettement établie quoique la salinité soit encore faible. En particulier, le Mg^{2+} est plus concentré que le Ca^{2+} ; Na^+ et Cl^- ont atteint des valeurs déjà élevées.

Plus en aval, l'eau devient franchement marine, d'abord près du fond (Aa), ensuite en surface (Ae), mais en tout cas avant de déboucher en mer dans les conditions d'étiage de nos observations.

Ce schéma est le même que celui qui a été relevé de nombreuses fois, à l'embouchure du Rhône en particulier (Pauc, 1970).

Répartition spatiale de la turbidité

Les observations ont eu lieu en période d'étiage (débits inférieurs à $10 \text{ m}^3/\text{s}$) et jusqu'en amont du coin salé, à la hauteur du village de Salles d'Aude (fig. 8).

A 13,5 km de l'embouchure (Ac), la salinité des eaux est très basse et homogène sur toute la tranche d'eau. On observe alors sur la hauteur du chenal un gradient vertical régulier de la turbidité, de 14 mg/l en surface à 25 mg/l au fond.

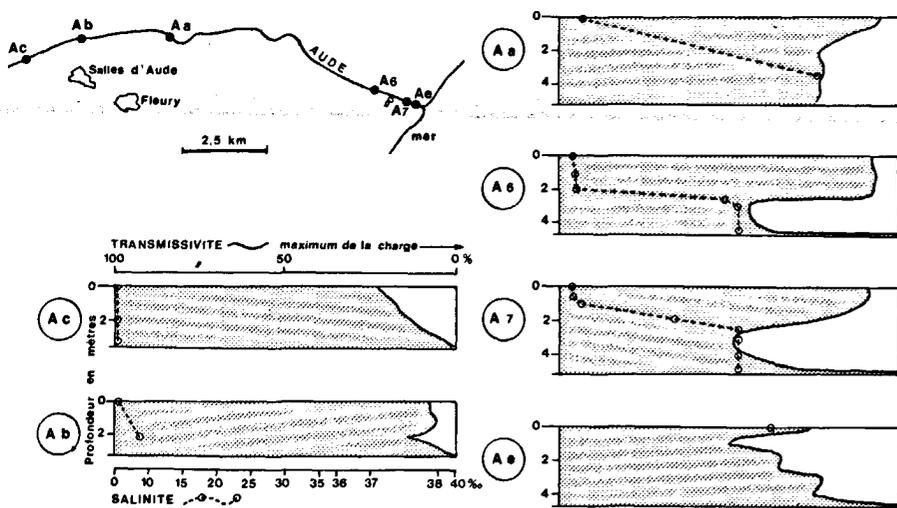


Figure 8
Relation entre la structure turbide et les propriétés hydrologiques dans le chenal de la rivière Aude (Languedoc, juin-juillet 1979).
Relations between turbid layers structures, turbidity and characteristics of the water masses in the River Aude channel (June-July, 1979).

En tête du coin salé (Ab), la salinité de surface est toujours extrêmement faible et passe au fond à environ 8 ‰. On assiste alors à un début de différenciation de la matière en suspension en 2 couches : une nappe de surface, épaisse de 1,5 m, avec une faible salinité (2 ‰) et une charge turbide de l'ordre de 10 mg/l, une couche turbide au contact du fond (15 mg/l) de salinité plus élevée (8 ‰) et épaisse d'environ 1 mètre.

Vers l'aval, au fur et à mesure que s'établit le coin salé, la différenciation devient plus nette (fig. 8, A6, A7) et aboutit dans l'embouchure (Ae) à une stratification multicouche, avec une couche superficielle centimétrique et des lentilles secondaires interstratifiées dans l'eau intermédiaire.

Nature et composition du matériel en suspension

Poids des suspensions (fig. 10A)

En surface on assiste à une forte diminution du poids de matériel en suspension entre les stations Ab (13 mg/l) et Aa (7,5 mg/l), c'est-à-dire au moment du franchissement de la zone de mélange des eaux fluviales et marines, lorsque le Mg²⁺ relaie le Ca²⁺ dans la composition ionique, en tête du coin salé.

A mi-profondeur la diminution pondérale est encore plus nette puisque en amont la charge à mi-hauteur est plus élevée qu'en surface (16,5 mg/l), alors que dans le coin salé au niveau de la masse d'eau intermédiaire c'est l'inverse.

Au fond, la charge est très élevée en amont du coin salé (24,5 mg/l), mais nous n'avons pas pu suivre son évolution en aval de la station Aa.

Taille et structure des suspensoides (fig. 10 B)

En surface, la taille maximale des suspensoides est élevée en amont du coin salé (255 μm en Ac). Il s'agit

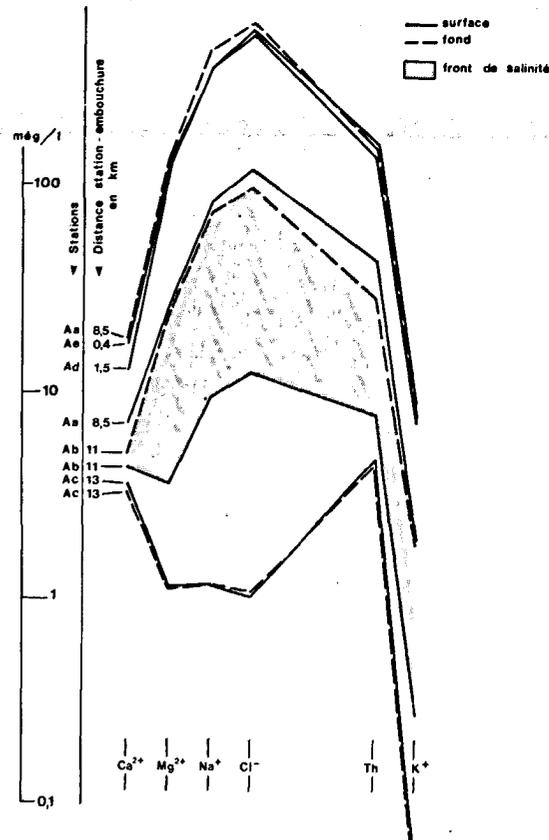


Figure 9
Composition ionique des eaux dans la basse vallée de l'Aude. Évolution des concentrations en surface et au fond montrant la structure du coin salé (juillet 1979).
Ionic composition of water in the lower Aude Valley. Evolution of the surface and bottom concentrations showing the salt wedge structure (July 1979).

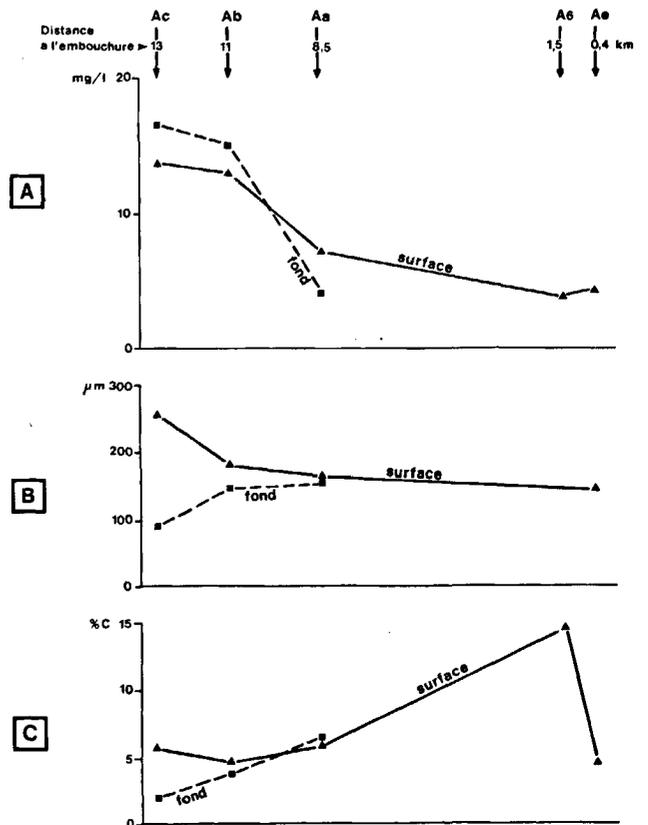


Figure 10
Variations des propriétés de la matière en suspension dans la basse vallée de l'Aude (Languedoc) en surface et au fond et d'amont en aval (juillet 1979); évolution de la charge solide (A), de la taille maximale des suspensoides (B) et de la teneur en carbone organique (C).

Variations of the properties of suspended matter in the lower valley of the Aude River (Languedoc), surface and bottom water, from upstream to downstream (July 1979); evolution of solid matter (A), maximum size of the suspensates (B) and organic carbon content (C).

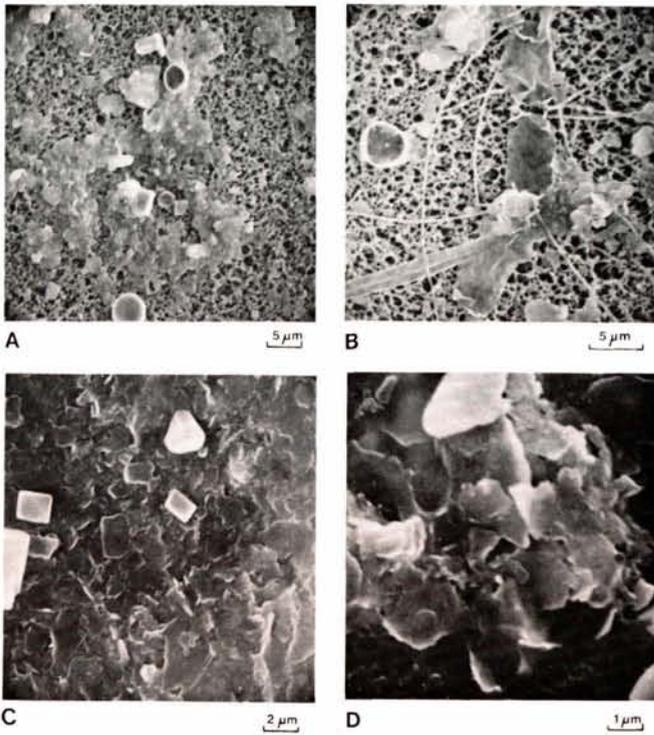


Figure 11

Microstructures de la matière en suspension dans la rivière Aude (Languedoc).

A-B : En amont du coin salé (station Ac, cf. fig. 8) et en surface, des structures agglomérées sont déjà présentes mais les particules terrigènes sont disposées à plat; les organismes, surtout diatomées, sont abondants.

C-D : En aval du coin salé (station Aa, cf. fig. 8) et dans la couche turbide au contact du fond les agglomérats inorganiques (ou flocons) formés par flocculation électrochimique sont constitués de particules disposées bord-face (observations effectuées au microscope électronique à balayage).

Microstructures of the suspended matter of the River Aude (Languedoc).

A-B : Up-stream of the salt wedge (Ac station, see Fig. 8), the superficial layer shows agglomerate structures but terrigenous particles are flat disposed (set out): organisms (diatoms) are abundant.

C-D : Down stream of the salt wedge (Aa station, see Fig. 8), the bottom nepheloid layer shows inorganic aggregates (or flocs) built by electrochemical flocculation containing edge-face flocs (observations by scanning electron microscope).

d'agrégats organo-minéraux nets qui renferment des débris de diatomées. Autour de ces gros édifices, des agrégats minéraux de petite taille et des particules isolées sont visibles (fig. 11 A et B).

A mi-hauteur de la tranche d'eau et au fond la dimension des suspensoides tend à augmenter au niveau du coin salé (85 μm en Ac; 150 μm en Ab), puis se stabilise (160 μm en Aa).

Après une diminution assez brutale au passage fluvio-marin (185 μm en Ab), le diamètre des suspensoides diminue faiblement jusqu'en domaine marin (165 μm en Aa; 145 μm en Ae). Tout se passe comme s'il y avait homogénéisation globale de la taille des suspensoides autour d'une valeur moyenne de l'ordre de 160 μm , sur toute la tranche d'eau.

Du point de vue microstructural, on passe au niveau du coin salé à des flocons complexes et plus trapus accompagnés de petits agrégats et de grains minéraux isolés (fig. 11 C et D).

Carbone organique particulaire (fig. 10 C)

La teneur en carbone organique des suspensions en sur-

face varie assez peu au passage du coin salé, de 4,5 à 6 %. Toutefois, juste avant l'embouchure (A 6) on observe une très forte augmentation, jusqu'à 14,5 %, qu'il est possible d'attribuer à un développement biologique.

Au fond, on note une augmentation assez nette de la teneur en carbone d'amont en aval en pénétrant dans le coin salé : 2 % en Ac; 6,5 % en Aa.

En définitive, comme pour le Rhône et malgré la période d'étiage, la stratification turbide apparaît très en amont dans le chenal des rivières côtières. Une fois de plus, on doit reconnaître le rôle, physico-chimique mais également dynamique, du coin salé.

En effet, toutes les transformations observées dans la suspension fluviale apparaissent dès que la salinité commence à augmenter et plus précisément lorsque s'inversent les relations ioniques entre le Ca^{2+} « fluviale » et le Mg^{2+} « marin » (Pauc, 1980). Dans ces conditions les matériaux en suspension tendent à flocculer de manière plus intense (Migniot, 1968), avec possibilité de chute vers le fond.

Tout se passe comme si la halocline retenait en amont une certaine quantité de matériel en suspension qui aurait du mal à s'écouler vers l'aval sur le fond par suite de la présence de l'interface saline et de la relative inertie dynamique du coin salé.

Embouchures des autres petits émissaires

De nouvelles mesures hydrologiques et de turbidité ont eu lieu en juin 1979 dans les petits fonds (10 à 30 m) au large des rivières Hérault et Aude et du Grau de Port-La-Nouvelle, sur la côte languedocienne du Golfe du Lion.

Des observations identiques à celles effectuées au large du Grand-Rhône ont été faites (fig. 12) :

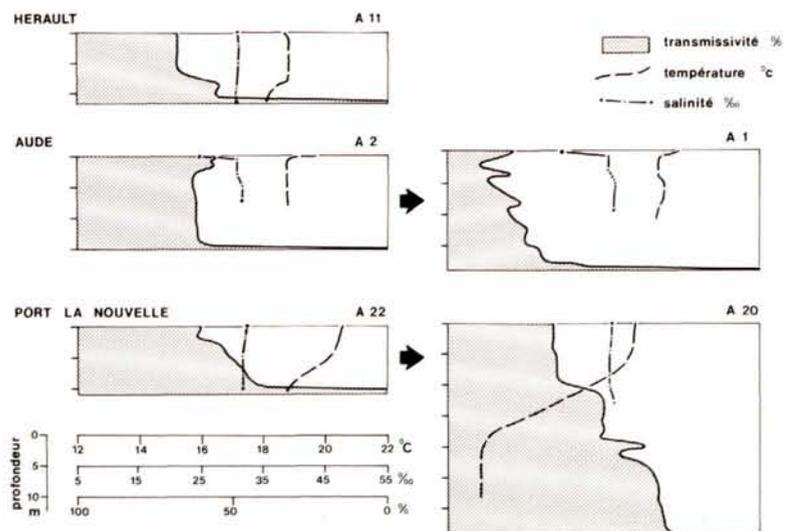


Figure 12

Structure du matériel en suspension au large des petits émissaires languedociens (Hérault, Aude, Port-La-Nouvelle). Relation avec les propriétés hydrologiques (voir position des stations fig. 1) (juillet 1979).

Suspended matter structure off the minor rivers (Herault, Aude, Port-La-Nouvelle). Relation with water mass characteristics (see position Fig. 1) (July 1979).

— la couche turbide centimétrique de surface est associée à la dessalure des eaux; elle se manifeste lorsque le débit fluvial est suffisant pour entraîner une perturbation du milieu marin adjacent; pendant la période d'observation elle n'est présente qu'à l'embouchure de l'Aude. L'Hérault avait un débit trop faible, quant au Grau de La Nouvelle, il fait communiquer l'étang salé de Sigean avec la mer;

— le néphéloïde profond est partout reconnaissable dès 10 m de profondeur et coïncide avec la thermocline; sa définition est meilleure à l'embouchure de l'Hérault et du Grau de La Nouvelle;

— la structure des couches turbides intermédiaires est plus ou moins complexe; dans le cas de l'Aude, il s'agit plutôt d'un gradient de turbidité régulièrement croissante vers le fond qui simule la sédimentation progressive du matériel en suspension en l'absence de thermocline.

Ces exemples confirment le schéma de constitution d'un néphéloïde très en amont dans les cours d'eau. L'hypothèse d'une alimentation par remaniement des fonds est peu probable puisqu'ici, les fonds sont uniquement sableux et contrastent avec la nature silto-argileuse et colloïdale du néphéloïde qui les surmonte.

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

Des relevés et mesures, effectués à diverses périodes, dans les chenaux, les embouchures des rivières et des fleuves et sur le plateau continental du Golfe du Lion ont permis de révéler une structure multicouche de la matière en suspension. Le modèle proposé par Aloïsi *et al.* (1979) pour le delta du Rhône a été affiné et peut désormais être étendu aux petites embouchures et à d'autres fleuves de la Méditerranée occidentale récemment étudiés (Èbre, Llobregat...).

La structure turbide stratifiée en couches superficielle, intermédiaire et profonde montre une bonne coïncidence avec les structures hydrologique et hydrodynamique, notamment la thermocline présente pendant les périodes d'observation (juin à octobre).

Ces recherches apportent un élément qui nous paraît essentiel et nouveau pour la Méditerranée, à savoir l'importance du transfert de matière alluviale par le fond par rapport à la « plume » turbide de surface sur laquelle on a toujours attiré l'attention, y compris pour les problèmes concernant la pollution.

Même du point de vue fondamental, il était intéressant de saisir le mécanisme d'élaboration de cette structure et principalement celui de la formation du néphéloïde benthique. Les points suivants nous paraissent devoir être retenus :

— une couche turbide terrigène se constitue dans le fond du chenal fluvial dans les zones plus amont que celles signalées par plusieurs auteurs (Meade, 1972; Gibbs, 1974). Elle est l'équivalent du bouchon vaseux des estuaires (Allen, 1973). Elle franchit l'embouchure et au-delà, tout en se maintenant en grande partie sous la thermocline, transite vers le large en empruntant d'abord un système de petits chenaux (largeur moyenne

~ 100 m), nettement marqués dans la bathymétrie jusque vers - 20 m dans le cas du Rhône, pour s'étaler ensuite vers l'aval sur tout le plateau continental à partir des différents émissaires. L'exemple le plus caractéristique est fourni par les petits émissaires où le néphéloïde traverse les petits fonds sableux;

— dans la zone du coin salé, l'interface saline et une relative inertie dynamique introduisent un phénomène de floculation électro-chimique qui se manifeste : par un échange cationique ($Mg \rightleftharpoons Ca$) déjà contrôlé *in vitro* (Monaco, 1970), un gradient de la charge turbide, une évolution de la taille des agglomérats en suspension (250 - 160 μm); la structure des flocons qui alimentent la couche turbide est elle-même significative;

— à l'embouchure, le néphéloïde benthique est nourri par l'agrégation organo-minérale liée à la productivité primaire; dans la tranche d'eau on note ce phénomène à divers niveaux d'observation : augmentation du carbone organique particulaire vers le fond, diminution de la taille des suspensoïdes avec la distance à la côte, en surface et au fond, disparition des couches turbides intermédiaires; tous ces phénomènes s'expriment particulièrement bien de l'embouchure au prodelta où s'effectue le maximum de dépôt pélagique.

Du point de vue dynamique, ce modèle permet d'expliquer la résultante sédimentaire telle qu'elle apparaît à travers les investigations indirectes et directes, notamment :

— la structure en prisme de l'unité sédimentaire, comparable à celle du néphéloïde benthique;

— le dépôt en « noyau » des argiles les plus fines (smectite et interstratifiés) dans le prodelta (Aloïsi, Monaco, 1975); plutôt qu'un phénomène de floculation, Baker (1973) et Gibbs (1974) invoquent un mécanisme hydrodynamique, voire la remontée de sédiments fins vers l'embouchure par un contre-courant;

— l'influence de la morphologie sous-marine qui oriente la dispersion du néphéloïde benthique y compris les canyons sous-marins; elle a été signalée par Baker (1976) dans les deltas profonds ou « deep-sea fans ». Le modèle ci-dessus aboutit pour le complexe rhodanien à un système d'apports, continu depuis le chenal fluvial jusqu'au bassin par l'intermédiaire des chenaux sous-marins littoraux et le canyon du Grand-Rhône.

En l'absence de thermocline et compte tenu de la faible cohésion des dépôts associée à une répartition homogène des vitesses sur la tranche d'eau, les sédiments sont susceptibles d'être remaniés et alimentent par advection le néphéloïde.

En conséquence, pour l'alimentation du bassin il faut distinguer, en ce qui concerne les grands émissaires (Rhône et Èbre) de la Méditerranée occidentale, un flux de matière latéral par un néphéloïde benthique directement hérité du fleuve et un flux vertical dominé par un phénomène d'agrégation organo-minérale. Le calcul des vitesses de sédimentation doit se faire compte tenu de cette double composante. Dans un système stratifié le comportement des différentes couches turbides peut être pratiquement indépendant. L'apport par le fond est soumis aux courants généraux et à la morphologie,

alors que le comportement des suspensions dépend surtout des turbulences d'origine météorologique.

Sur la plate-forme continentale du Golfe du Lion on a calculé des déplacements virtuels des particules près du fond pour des courants supérieurs à 10 cm/s (Aloisi *et al.*, 1979); ils sont de l'ordre de 1,5 km/jour, donc notablement plus forts que les vitesses verticales données pour le flux des aluminosilicates (2,6 m/jour).

Il s'ensuit que le néphéloïde benthique assure un transfert de particules rapide et presque continu à travers le plateau et vers le bassin. Le modèle proposé ici répond en partie à la question posée par certains auteurs sur le mécanisme d'alimentation des bassins par la matière terrigène échappée de la sédimentation épicontinentale (Mc Cave, 1972).

RÉFÉRENCES

- Allen G.P., 1973. Étude des processus sédimentaires dans l'estuaire de la Gironde, *Thèse Doct. Etat, Univ. Bordeaux I*, 369, 314 p.
- Aloisi J.C., Monaco A., 1975. La sédimentation infralittorale. Les prodeltas nord-méditerranéens, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 280, 2833-2836.
- Aloisi J.C., Monaco A., Pauc H., 1975. Mécanismes de la formation des prodeltas dans le Golfe du Lion. Exemple de l'embouchure de l'Aude (Languedoc), *Bull. Géol. Bassin Aquitaine*, 18, 3-12.
- Aloisi J.C., Cauwet G., Gadel F., Got H., Monaco A., Vile F., Causse C., Pagnon M., 1976. Contribution à l'étude de la sédimentation récente et de la pollution sur le plateau continental du Golfe du Lion entre Fos-sur-Mer et Sète, *Bull. BRGM*, 4, 2, 69-83.
- Aloisi J.C., Monaco A., Millot C., Pauc H., 1979. Dynamique des suspensions et mécanismes sédimentogénétiques sur le plateau continental du Golfe du Lion, *C.R. Acad. Sci. Paris, sér. D*, 289, 879-882.
- Arnoux A., Chamley H., 1974. Minéraux des argiles et détergents des eaux interstitielles dans les sédiments superficiels du Golfe du Lion, *C.R. Acad. Sci. Paris*, 278, 999-1002.
- Baker E.T., 1976. Distribution, composition and transport of suspended particulate matter in the vicinity of Willepa submarine canyon, Washington, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87, 625-632.
- Biscaye P.E., Eitrem S.L., 1974. Variations in benthic boundary layer phenomena, nepheloid layer in the North American Basin, in : *Suspended solids in water*, edited by R.J. Gibbs, Plenum, New York, 227-260.
- Boutière H., Fiala A., Jacques G., Soyer J., 1974. *Écologie marine sur le littoral du Languedoc-Roussillon (de Sète au Cap Creus)*, Publ. CNEXO, Rapport de Contrat n° 73/795.
- Brun-Cottan J.C., 1971. Étude de la granulométrie des particules marines. Mesures effectuées avec un compteur Coulter, *Cah. Océanogr.*, 23, 193-205.
- Chamley H., 1971. Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée, *Thèse Doct. Etat, Univ. Aix-Marseille*, 5762, 401 p.
- Drake D.E., 1976. Suspended sediment transport and mud deposition in continental shelves, in : *Marine sediment transport and environmental management*, edited by D.J. Stanley and D.J.P. Swift, Wiley, NY, 127-158.
- Emelyanov E.M., Shimkus K.M., 1972. Suspended matter in the Mediterranean Sea, in : *The Mediterranean Sea*, edited by D.J. Stanley, Dowden Hutchinson and Ross., 417-439.
- Ewing M., Thorndike E.M., 1965. Suspended matter in the deep-sea water, *Science*, 147, 1291-1294.
- Feely R.A., Baker E.T., Schumacher J.D., Massoth G.J., Landing W.M., 1979. Processes affecting the distribution and transport of suspended matter in the northeast Gulf of Alaska, *Deep-Sea Res.*, 26, 4A, 445-464.
- Fioux M., 1972. Contribution à l'étude hydrologique et dynamique du Golfe du Lion en période hivernale, *Thèse 3^e cycle, Univ. Paris*.
- Gibbs R.J., 1974. The suspended matter of the Amazon Shelf and tropical Atlantic Ocean, in : *Suspended solids in water*, edited by R.J. Gibbs, Plenum Press, 203-210.
- Got H., Pauc H., 1970. Étude de l'évolution dynamique récente au large de l'embouchure du Grand-Rhône par l'utilisation des rejets du centre nucléaire de Marcoule, *C.R. Acad. Sci. Paris, sér. D*, 271, 1956-1959.
- Harlett J.C., Kulm L.D., 1973. Suspended sediment transport on the Northern Oregon continental Shelf, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, 3815-3826.
- Krone R.B., 1962. *Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes-final report*, Berkeley, Univ. California, Hydraulic Eng. Lab. and Sanitary Eng. Research Lab., 110 p.
- Mc Cave I.N., 1972. Transport and escape of fine grained sediment from shelf areas, in : *Shelf sediment transport*, edited by D.J.P. Swift, D.B. Duane and O.H. Pilkey, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pa., 225-248.
- Maldonado A., Stanley D.J., 1978. Nile Cone depositional processes and patterns in the Late Quaternary, in : *Sedimentation in submarine canyons, fans and trenches*, edited by D.J. Stanley and G. Kelling, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, 239-257.
- Manheim F.T., Meade R.H., Bond G.C., 1970. Suspended matter in surface waters of the Atlantic continental margin from Cape Cod to the Florida Keys, *Science*, 167, 371-376.
- Martin J.M., Meybeck M., 1979. Elemental mass-balance of material carried by major world rivers, *Mar. Chem.*, 7, 173-206.
- Meade R.H., 1972. Transport and deposition of sediments in estuaries, *Geol. Soc. Am. Mem.*, 133, 91-120.
- Migniot C., 1968. Étude des propriétés physiques de différents sédiments très fins et de leur comportement sous des actions hydrodynamiques, *La Houille Blanche*, n° 7, 591-620.
- Milliman J.D., Summerhayes C.P., Barretto H.T., 1975. Oceanography and suspended matter of the Amazon River, *J. Sed. Petrol.*, 45, 189-206.
- Millot C., 1979. Wind induced upwelling in the Gulf of Lions, *Oceanol. Acta*, 2, 3, 261-274.
- Millot C., Lamy A., 1978. *Lion 77. Rapport de présentation de mesures*, *Museum National d'Histoire Naturelle*, rap. 78-02, 198 p.
- Monaco A., 1970. Sur quelques phénomènes d'échanges ioniques dans les suspensions argileuses au contact de l'eau de mer, *C.R. Acad. Sci., Paris*, 270, 1743-1746.
- Monaco A., 1971. Contribution à l'étude géologique et sédimentologique du plateau continental du Roussillon (Golfe du Lion), *Thèse Univ. Montpellier*, 295 p.
- Monaco A., 1977. Géochimie des milieux d'estuaire : comparaison entre les suspensions fluviales et les dépôts prodeltaïques de l'Aude (Languedoc), *Chem. Geol.*, 20, 45-55.
- Morel Y., 1971. Introduction à l'étude du rôle des matières minérales amorphes dans les échanges eau-sédiment en milieu estuarien et marin, *Thèse 3^e cycle, Fac. Sci. Orsay*.
- Nelson B.W., 1972. Mineralogical differentiation of sediments dispersed from the Po Delta, in : *The Mediterranean Sea*, edited by D.J. Stanley, Dowden, Hutchinson and Ross, 441-453.
- Pauc H., 1970. Contribution à l'étude dynamique et structurale des suspensions solides au large de l'embouchure du Grand-Rhône (Gru de Roustan), *Thèse 3^e Cycle, Perpignan, Montpellier*, 126 p.
- Pauc H., 1980. Flocculation et potentiel de surface des matériaux en suspensions en environnement d'embouchure, *C.R. Acad. Sci. Paris, sér. B.*, 290, 175-178.
- Venkatarathnam K., Biscaye P.E., Ryan W.B., 1972. Origin and dispersal of Holocene sediments in the Eastern Mediterranean Sea, in : *The Mediterranean Sea*, edited by D.J. Stanley, Dowden, Hutchinson and Ross, 445-469.
- Whitehouse U.G., Jeffrey L.M., Debbecht J.D., 1960. Differential settling tendencies of clay minerals in saline waters, in : *Clay and clay minerals : Nath. Conf. on clays and clay minerals*, edited by Swineford, Ada, 7th Washington, 1958, Proc. New York, Pergamon Press, 1-79.
- Yamamoto S., 1979. Size distribution of detrital mineral grains suspended in surface waters of the Yellow Sea and East China Sea, *J. Oceanogr. Soc. Jpn*, 35, 2, 91-99.
- Zabawa C.F., 1978. Microstructure of agglomerated suspended sediments in Northern Chesapeake Bay Estuary, *Sciences, New York*, 202, 49-51.