

PARTICULES EN SUSPENSION DANS LA BAIE DE SEINE : CONCENTRATION ET SEDIMENTATION INSTANTANEE EN PERIODE D'ETIAGE.

BRUN-COTTAN J.C.L.\* , BEN BRAHIM M.\*.

INTRODUCTION ET DEFINITION DE LA STRATEGIE DE MESURE

Au cours de la campagne ELIE-83, effectuée en décembre 1983 sur la Thalassa en Baie de Seine, 200 spectres de taille des particules en suspension ont été mesurés. A chaque station, 3 prélèvements ont été effectués en surface, près du fond et dans la zone de transition. Les profondeurs, salinité et température des prélèvements étaient déterminées par une CTD Guildline du PIROCEAN. Les mesures granulométriques ont été faites à bord dans les minutes qui suivent leur prélèvement, selon le principe "Coulter" (2,6), avec une sonde de 380  $\mu\text{m}$ , un détecteur et un amplificateur logarithmique couplés avec un analyseur multicanal à 200 points (3, 4, 5, 6). La sonde de 380  $\mu\text{m}$  permet d'analyser la taille des particules dont les dimensions sont comprises entre 10 et 150  $\mu\text{m}$ . L'utilisation d'une sonde de 100  $\mu\text{m}$  permettrait l'analyse du spectre de tailles des particules de 1 à 40  $\mu\text{m}$ , qui représentent près de 90% de la concentration massique des suspensions marines, mais moins de la moitié de leur flux de sédimentation instantané (3, 4, 5, 6, 7). L'emploi de la sonde de 100  $\mu\text{m}$  en milieu estuarien, très concentré, est délicat, il nécessite soit une dilution de la suspension étudiée dans de l'eau de mer filtrée, soit une électronique à seuil de détection variable, car les spectres mesurés directement sont déformés, effet de minimisation du nombre des particules de fort diamètre par les fortes concentrations en nombre de particules (3.5). De plus, un Coulter équipé d'une sonde de 100  $\mu\text{m}$  était utilisé lors de cette campagne par le laboratoire de Sédimentologie de Rouen.

La sonde de 380  $\mu\text{m}$  permet de mesurer directement le spectre de tailles en évitant les artefacts dus à une trop forte concentration en petites particules et surtout d'analyser les particules responsables de la quasi totalité du flux de sédimentation instantané, cela toutefois au détriment des petites particules inférieures à 10  $\mu\text{m}$  qui portent souvent plus de la moitié de la concentration massique, la concentration ainsi mesurée correspond à 30 à 50% de la concentration totale réelle, ceci est vrai en ce qui concerne les suspensions en haute mer ainsi que pour quelques exemples de vases estuariennes (1). Nous avons donc fait le pari que les particules de moins de 10  $\mu\text{m}$ , dans la baie de Seine, ne portent qu'une part négligeable du flux de sédimentation instantané, comme pour les suspensions connues.

Le logiciel utilisé permet d'estimer la proportion des petites particules non mesurées, dans la mesure où elles suivent la même loi lognormale que les particules prises en compte, les écarts à cette loi peuvent introduire une erreur sur l'estimation pondérale des particules significativement mesurables, c'est-à-dire dont la taille est comprise entre 1 et 150  $\mu\text{m}$ . Le choix de la sonde de 380  $\mu\text{m}$  est donc, a priori, celui qui convient le mieux pour obtenir les spectres de tailles à partir desquels nous tentons un premier essai de quantification des flux de sédimentation des particules estuariennes.

\* Laboratoire de Physique et Chimie Marines, Université Pierre & Marie Curie-Tour 24, 4, Place Jussieu - 75230 Paris Cédex 05.

Les conditions de prélèvement des points localisés sur les différentes radiales, définies pour la mission Elie-83, varient à la fois dans le temps et dans l'espace, elles ne permettent donc pas d'identifier facilement d'éventuelles relations entre les différents paramètres étudiés. Les mesures analysées sont donc essentiellement celles effectuées aux points fixes F3 et F4, situés respectivement à 2,8 miles dans le 315° du cap d'Antifer et à 2,1 miles dans l'ouest du cap de la Hève, ainsi qu'aux stations dérivantes correspondantes, de type lagrangien, situées pour B3 entre F3 et 4 miles au sud-ouest de F3 et pour B4 entre F4 et 4 miles nord-nord-est de F4.

#### RESULTATS GRANULOMETRIQUES

La distribution granulométrique des particules, entre 10 et 150  $\mu\text{m}$ , étudiées au cours de la campagne Elie-83 est pratiquement toujours très bien décrite par une fonction log-normale, comme cela est visible sur la figure 4. Elle est généralement unimodale pour cette gamme de tailles, parfois bimodale dans la zone de mélange entre l'eau saumâtre et l'eau de mer.

Parmi les différents paramètres centraux définissant les spectres de tailles, le diamètre moyen relatif à la distribution des volumes des particules semble le plus représentatif, c'est donc lui qui est utilisé ici. Les valeurs de ce diamètre pour les particules contenues dans l'eau salée ou saumâtre de la baie de Seine sont nettement plus élevées que celles des particules franchement marines (1, 3, 5, 6, 7, 9). Elles varient de 78  $\mu\text{m}$  dans les eaux les plus douces à 33  $\mu\text{m}$  dans les eaux les plus salées. Cela est visible sur les figures 1 et 3, particulièrement aux stations B4 et F4, ainsi que sur les courbes de la figure 4.

Les prélèvements dits "moyens" ont été effectués, quand cela était possible, à l'interface eau saumâtre-eau de mer, en F4 le gradient vertical était très fort, d'où le fait que la salinité du point moyen oscille entre celle de l'eau de surface et celle de l'eau profonde, le diamètre moyen des particules correspondant à ces points est lui toujours analogue à celui de l'eau de surface; cela montre que la forme des spectres granulométriques des particules se propage plus rapidement vers le bas que par un simple mélange turbulent, ce qui est suggéré par leur forte vitesse de chute (fig. 4).

#### ESTIMATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DES PARTICULES.

Les paramètres des particules qui intéressent le plus les géochimistes et les sédimentologues sont ceux relatifs aux concentrations massiques, aux flux de sédimentation et au temps de résidence des éléments sous leurs différentes phases; pour y avoir accès à partir des spectres de tailles, il faut connaître la masse volumique des particules étudiées. Cette masse volumique n'est en fait ni mesurée ni bien connue, elle dépend essentiellement de l'origine, terrigène ou biogène des particules, mais on a pu observer que de manière générale elle décroît lorsque la taille des particules augmente (9), cela étant dû à ce que les plus grosses particules sont principalement constituées de matière organique fortement hydratée pouvant contenir divers éléments fins en proportion variable. Dans le cas présent, faute de mesures directes, la masse volumique des particules est estimée décroître selon une loi "puissance" de leur taille (3, 4, 5, 6, 9) rendant au mieux compte en moyenne des mesures de densité effectuées sur des suspensions naturelles. Ces suspensions concernent essentiellement des particules marines (2, 9), certaines mesures ont toutefois été effectuées au voisinage d'embouchures rejetant des suspensions fortement terrigènes, comme le Var et le Congo (3, 5), il apparaît pour ces deux exemples une augmentation de la densité "humide" pouvant atteindre 50%.

A partir de cette évaluation et des paramètres caractéristiques de la fonction log-normale associée, il devient possible de calculer la concentration massique des particules en suspension (concentration humide), leur flux de sédimentation instantané et leur vitesse moyenne de chute. L'erreur introduite par l'estimation arbitraire de la masse volumique des particules ne doit pas,

d'après les deux cas cités, dépasser 50% sur l'évaluation de la concentration massique, puisque pour une classe de taille cette concentration est proportionnelle à cette masse volumique; par contre elle peut être importante sur l'évaluation du flux vertical, puisque l'erreur sur le flux est proportionnelle à l'erreur sur la concentration que multiplie l'erreur sur la différence entre la masse volumique des particules et celle de l'eau. L'approche proposée ici est toutefois, actuellement, la seule qui permette une évaluation directe du flux vertical instantané de sédimentation.

#### CHARGE MASSIQUE, RESULTATS ET DISCUSSION

La concentration massique correspondante à un canal est le nombre de particules comptées dans ce canal, multiplié par leur volume moyen (la largeur d'un canal est de 2% de la taille qui lui correspond) et multiplié par la masse volumique humide afférente à cette taille. La charge totale est obtenue par la sommation des charges des 200 canaux, plus les charges estimées des extrémités non mesurées des spectres. Ces dernières valeurs sont calculées en posant que ces extrémités sont en continuité lognormale avec la partie mesurée du spectre.

Pour l'ensemble des 200 échantillons analysés, comme pour ceux des 4 stations B et F, la concentration estimée varie en moyenne entre 1 à 5 mg/l, avec des valeurs maximales autour de 15 mg/l. Nous avons comparé nos valeurs avec celles obtenues, lors de la même campagne par le laboratoire de sédimentologie de Rouen (7). Ce laboratoire a mesuré les spectres granulométriques des particules dont la taille était comprise entre 1.5 et 40  $\mu\text{m}$ , ainsi que la charge massique par pesée à sec et la turbidité par néphélogéométrie *in situ*. Les spectres obtenus par cette équipe sont très souvent unimodaux, le pic étant situé au voisinage de 7  $\mu\text{m}$  comme pour les suspensions purement marines, avec une quasi absence de particules au-delà de 15  $\mu\text{m}$  (présentation orale de ces résultats), ceci permet de simplifier la procédure de comparaison en assumant que le recouvrement entre leurs spectres et les nôtres est quasi nul. Pour vérifier que notre impasse sur la mesure des petites particules était justifiable, nous avons pris le parti d'optimiser la charge des particules mesurées par le laboratoire de Rouen en leur affectant une masse volumique moyenne de 1.6 gr/l, qui est une valeur maximale admissible pour des particules humides (1, 2, 3, 5).

La situation idéale eut donc été que la somme des charges estimées à partir des mesures granulométriques des deux laboratoires soit voisine de la charge mesurée par pesée. Cette situation est proche de la réalité uniquement lorsque les charges pondérales sont inférieures à 5 mg/l, mais alors la corrélation entre les deux types de mesures est faible; dans ce cas, les concentrations correspondantes aux familles des petites et des grosses particules sont voisines. Lorsque la charge pondérale dépasse 5-6 mg/l, la concentration en petites particules reste pratiquement invariante, tandis que la concentration en grosses particules tend à suivre la charge pondérale; la charge totale estimée est donc alors en majorité le fait de la famille des grosses particules, tout en étant souvent inférieure à la charge pondérale. Ceci semble indiquer que les fortes charges sont surtout supportées par les particules les plus grosses et que, soit notre instrumentation ne les voit pas toutes, soit leur masse volumique est supérieure à notre estimation à partir des mesures au large. Il faut toutefois être prudent dans l'interprétation de ces comparaisons, d'autant que les mesures de turbidité ne sont en corrélation avec aucun des autres types de mesures.

Il semble que pour ces 4 stations (surtout F4 et B4), apparaisse une certaine périodicité, d'autant que ces stations n'ont pas été effectuées au cours de la même marée, il est toutefois difficile de généraliser cette constatation sur un nombre de périodes aussi restreint. En B4 et F4 l'apparition d'eau douce en surface correspond au moment où les courants portent au large entraînant l'eau de la Seine (10), ceci est logique pour la station fixe F4, pour la station B4 cela implique soit un très fort coefficient de mélange

horizontal, soit que la trajectoire du bateau n'ait pas été strictement lagrangienne et qu'il soit sorti de la masse d'eau suivie. La charge en particules varie sensiblement dans le temps, elle ne semble pas liée à la salinité mais plutôt à un effet de mélange lié à la marée. Une nette augmentation, spasmodique, de la charge apparaît au voisinage du fond en F4, elle peut être interprétée comme étant une remise en suspension due à la friction du courant sur le fond, fort à ce moment de la marée (10).

#### FLUX DE SEDIMENTATION DES SUSPENSIONS, RESULTATS ET DISCUSSION

Le flux de sédimentation instantané des suspensions analysées est calculé par la même procédure que celle utilisée pour la charge massique, en multipliant ici la concentration de chaque classe de taille par la vitesse de chute lui correspondant et en évaluant le flux des extrémités non mesurées par continuité lognormale. En ce qui concerne la famille des grosses particules, mesurées par notre laboratoire, le flux de sédimentation instantané varie de 0.3 à 4 g/m<sup>2</sup>/heure, il est très fortement lié à la granulométrie, comme cela apparaît clairement fig. 4 où le diamètre moyen portant le flux de sédimentation est compris entre 40 et 150 µm. La part du flux de sédimentation afférente aux petites particules peut être négligée, en effet, pour les charges inférieures à 5 mg/l nous avons vu précédemment que les deux familles participent à peu près à parts égales, comme les diamètres moyens de ces familles sont dans un rapport de 4 à 6, le rapport des flux correspondants est largement supérieur à 15; pour les fortes charges, ce rapport est encore beaucoup plus élevé du fait que même la participation massique des petites particules est faible.

L'incertitude sur la connaissance de la masse volumique des particules est particulièrement gênante dans l'évaluation du flux de sédimentation, puisque, comme nous l'avons écrit précédemment, la vitesse de chute est proportionnelle à la différence entre la masse volumique des particules et celle de l'eau de mer. L'estimation faite sur les grosses particules est basée sur l'hypothèse, en général vérifiée, que les particules de plus de 15 µm sont très fortement hydratées. Les valeurs des flux ainsi obtenues peuvent être considérées comme minimales; il n'est pas à exclure que les valeurs réelles puissent être nettement plus élevées, peut être d'un facteur 2, voire 3.

La mission Elie 83 a eu lieu en période d'étiage, ce qui correspond aux flux de sédimentation les plus faibles, or l'intégration à l'échelle de l'année des flux instantanés calculés ici, fournit des taux de sédimentation démesurément trop élevés, il semble évident que la majeure partie des particules qui atteignent le fond, soit remise en suspension ultérieurement; en simplifiant, on peut même admettre que pour une durée de quelques cycles de marée, le bilan dépôt/érosion puisse être considéré comme nul. Dans ce cas, à l'échelle de la baie de Seine, le flux de remise en suspension dans la colonne d'eau doit équilibrer le flux de sédimentation. Le flux de sédimentation  $\Phi$  est donc alors nul,  $\Phi = w.C - K_z \cdot (dC/dz) = 0$ , C étant la concentration massique, w étant la vitesse instantanée de chute de l'ensemble des particules, calculée à partir des spectres granulométriques et  $K_z$  le coefficient de diffusion turbulente verticale.  $K_z$  étant grand dans cette zone littorale à forts courants de marée, le gradient  $dC/dz$  nécessaire à l'annulation de  $\Phi$  n'est pas décelable. L'expression du flux donnée ici est eulérienne, mais dans la mesure où la turbulence est un phénomène statistique à moyenne nulle et où  $K_z$  est considéré constant dans la colonne d'eau (6), ce qui n'est en fait jamais vrai au voisinage du fond, on peut admettre que d'un point de vue lagrangien, les particules se comportent comme si elles chutaient dans toute la colonne d'eau avec la vitesse w, puis étaient remises en suspension à partir du fond et homogénéisées dans la masse d'eau.

#### TEMPS DE RESIDENCE DES SUSPENSIONS, DISCUSSION

A partir de la connaissance du flux de sédimentation, de la vitesse w et de la hauteur de la colonne d'eau, on peut estimer le temps de résidence moyen

dans l'eau, entre deux remises en suspension. D'après nos mesures, ce temps serait compris entre 0.5 et 2 jours. Dans le cas où la masse volumique des particules serait plus élevée que celle estimée, cela impliquerait une diminution du temps de résidence. La concentration en petites particules peut ici jouer un rôle non négligeable, l'introduction des valeurs obtenues par le laboratoire de Rouen peut amener un doublement des temps de résidences déduits de nos mesures.

Ces valeurs de temps de résidence peuvent être obtenues de manière analogue à partir du flux virtuel de sédimentation des particules (c'est-à-dire le terme correspondant au seul effet de la vitesse  $w$ , qui, intégré sur un cycle de marée aux points F3 et F4 donnerait un dépôt de l'ordre de  $20 \text{ g/m}^2$ ), l'ordre de grandeur de la hauteur moyenne  $h$  de la colonne d'eau et la concentration moyenne obtenue à partir de la quantité totale de matière en suspension intégrée sur cette colonne, le "standing crop", qui est de l'ordre 80 à 150 g. Le temps de résidence s'écrit alors :  $t = h.C/\phi$ .

La capacité qu'ont les particules à servir de vecteur d'échange d'éléments chimiques entre l'eau et le sédiment dépend non seulement de leur temps de résidence dans l'eau, mais aussi de leur temps de résidence dans le sédiment superficiel et du rapport de ces temps, qui est une sorte d'indice de "turn-over". Le temps de résidence dans le sédiment est fonction de la profondeur de remaniement, plus cette profondeur est importante, plus le temps de résidence dans la couche sujette à remise en suspension est élevé. Le meilleur moyen de connaître le temps de résidence des particules dans le sédiment est la mesure de la décroissance dans le sédiment superficiel de radioéléments dont la période est de l'ordre de quelques jours à quelques semaines, comme par exemple le  $^{234}\text{Th}$ . De telles mesures n'ont pas encore été effectuées en Baie de Seine. Dans l'hypothèse où la majeure partie des particules serait remise en suspension dans un cycle de marée, les particules passeraient en moyenne deux fois plus de temps dans l'eau que dans le sédiment, ce rapport s'inverserait dès que l'essentiel du remaniement sédimentaire se produirait sur une durée atteignant la période d'un cycle de vive eau.

#### CONCLUSION.

Les quelques données présentées ici n'ont de valeur que pour les conditions d'étiage de cette mission, qui bien que n'étant pas de saison, sont en moyenne les plus fréquentes. Elles ne prennent pas en compte les effets des crues et des tempêtes qui tout en n'étant que des phénomènes de courte durée, sont peut être dominants en termes de bilans globaux.

- 
- Brun-Cottan J.C. (1967).- Influence du marquage radioactif sur les paramètres dynamiques des sédiments pélagiques. Thèse de 3ème cycle.
- Brun-cottan J.C. (1971).- Etude de la granulométrie des particules marines. Mesures effectuées avec un compteur Coulter. Cahiers Océanogr., vol 23, n° 2, pp. 193-205.
- Brun-Cottan J.C. (1976).- Contribution à l'étude de la granulométrie et de la cinétique des particules marines. Thèse de doctorat d'Etat en sciences physiques, Université Pierre & Marie Curie, 12 février 1976.
- Brun-Cottan J.C. (1976).- Stokes settling and dissolution rate model for marine particles as a function of size distribution. Journal of Geophysical Res. vol. 81 n° 9, 20 mars 1976, pp. 1601-1605.
- Brun-Cottan J.C. (1977).- Contribution à l'étude de la granulométrie et de la cinétique des particules marines. Journal de Recherches Océanographiques vol. 1, 1976, pp. 41-54.
- Brun-Cottan J.C. (1985).- Vertical transport of particles within the Ocean. NATO-ASI on "The role of Air-Sea exchange in geochemical cycling" Bombannes, France 16-27 septembre 1985. Publié par Reidel courant 1986.

- Lafite R., Dupont J.P. & Lamboy M. (1985).- Stratégie d'étude des suspensions mise en oeuvre en Baie de Seine. Ce volume, N° 11.
- Lambert C., Jehanno C., Silverberg N., Brun-Cottan J.C. & Chesselet R. (1981).- Log-normal distribution of suspended particles in the Ocean. Journal of Marine Research, vol. 39, 1, 1981, pp. 77-98.
- Mac-Cave I.N. (1975).- Vertical flux of particles in the Ocean. Deep Sea Research, 1975, vol. 22, pp. 491-502.
- Salomon J.C. & Le Hir P. (1977).- Etude de l'estuaire de la Seine : modélisation numérique des phénomènes physiques. Laboratoire d'Océanographie Physique, Faculté des Sciences et Techniques, Université de Bretagne Occidentale.

## ELIE "83"

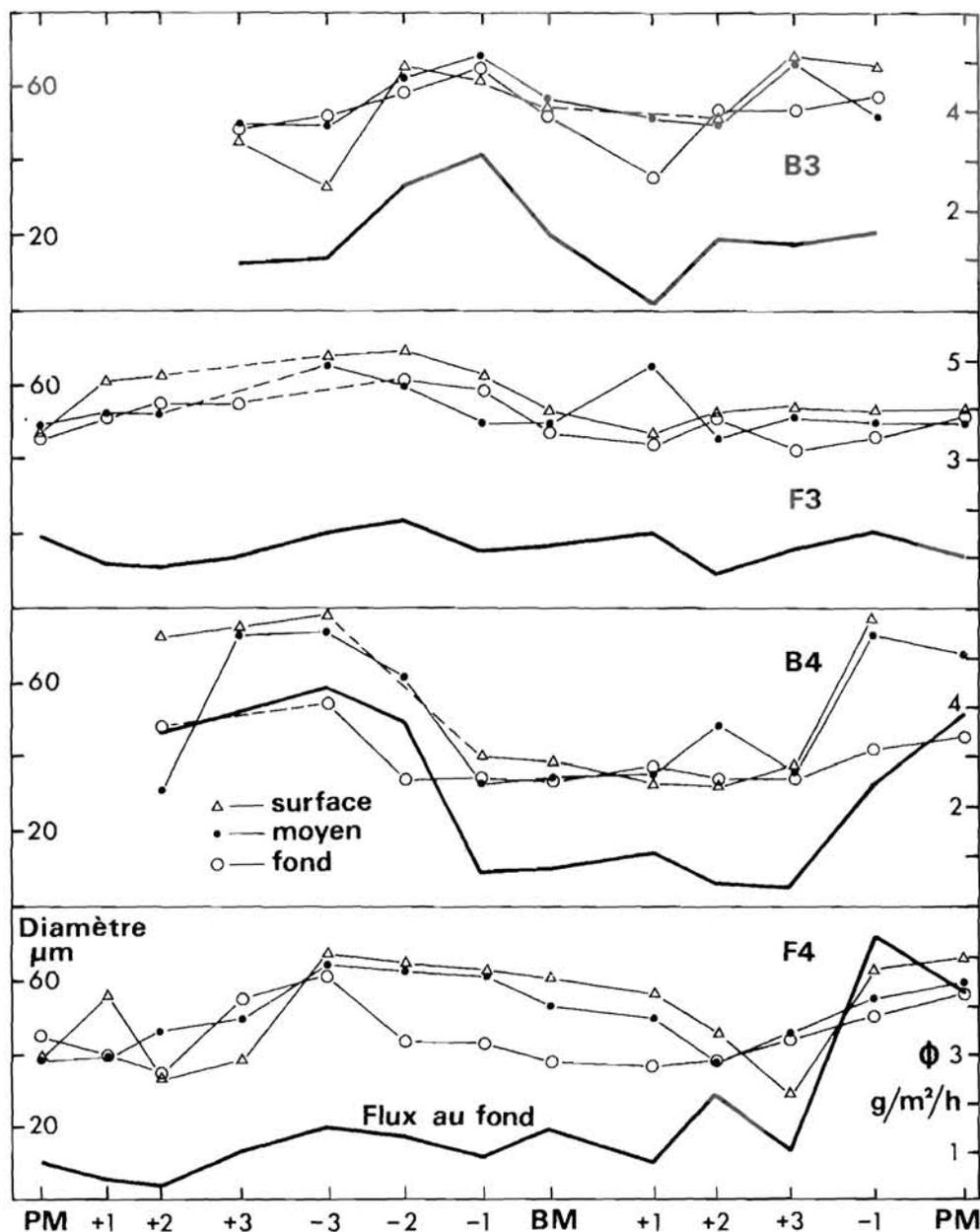


fig. 1

Le flux au fond est calculé à partir de l'échantillon le plus près du fond. La quantité de particules déposée par cycle de marée étant calculée par intégration du flux heure par heure et la vitesse moyenne de chute étant de l'ordre de 30 cm/heure, seules les particules contenues dans les derniers mètres sont donc prises en compte. L'effet de la taille sur le flux de sédimentation apparaît ici prépondérant par rapport à celui de la charge.

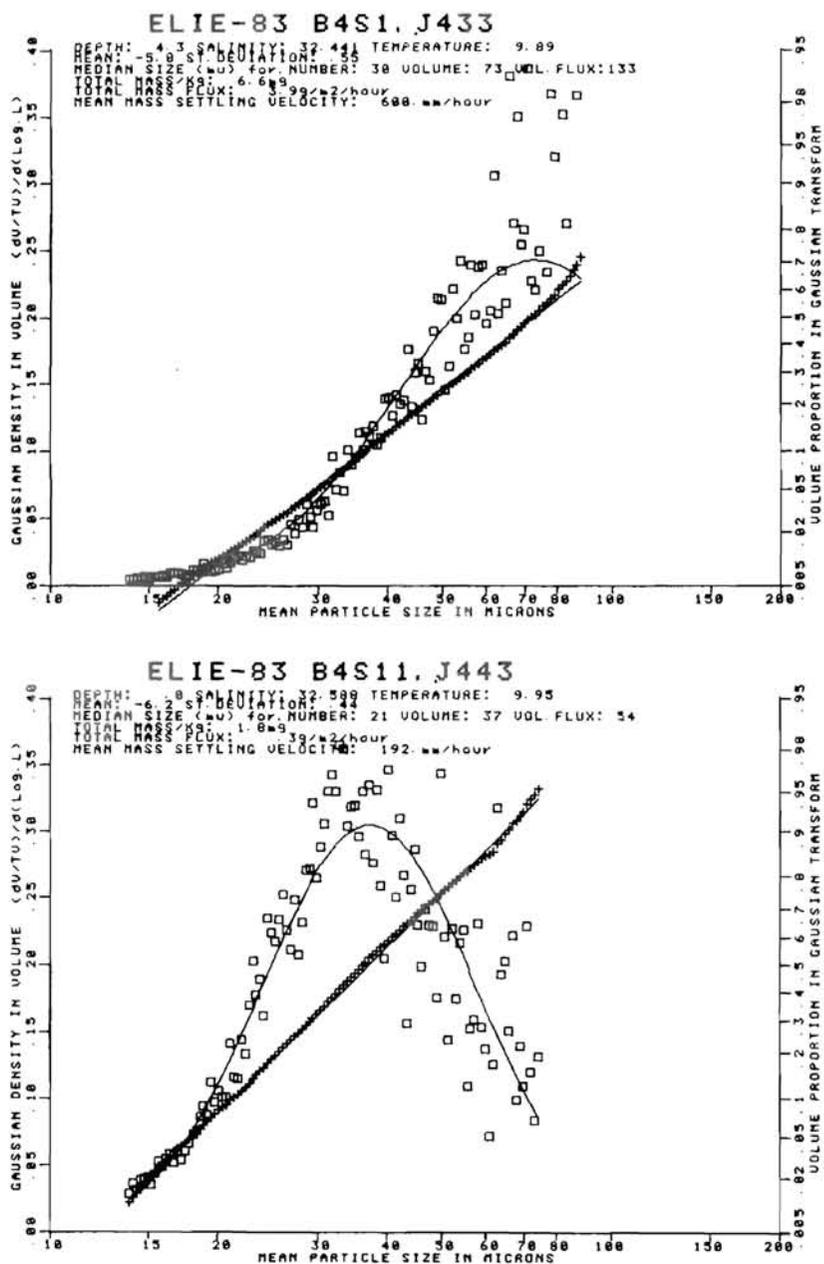


fig. 4

Distribution granulométrique en Baie de Seine: les carrés représentent la densité de probabilité des particules de la taille considérée "L", caractérisées par leur volume  $dV$  (axe de gauche); la courbe passant par ces points est la gaussienne associée à la meilleure loi log-normale les décrivant. Les croix représentent l'intégrale des valeurs précédentes, dont la proportion en volume des particules ayant une taille inférieure à L (axe de droite), la courbe qui les décrit est la droite de Henri. B4S1 est un échantillon caractéristique de l'eau de surface peu salée, B4S11 représente l'eau typiquement marine.