

Variation horizontale du flux particulaire à micro- et méso-échelle dans la plaine abyssale de Californie (4 100 m de profondeur)

Pièges à particules
Abyssal
Variation horizontale du flux

Sediment traps
Deep sea
Horizontal flux variation

Philippe CRASSOUS et Alexis KHRIPOUNOFF

Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Centre de Brest, B.P. 70, 29280 Plouzané, France.

Reçu le 17/05/93, révisé le 29/09/93, accepté le 6/10/93.

ABSTRACT

Neuf pièges à particules, ont été réunis trois par trois, puis positionnés sur trois lignes indépendantes à 100 m au-dessus du fond par 4 100 m de profondeur pendant dix jours dans la plaine abyssale de Californie. La distance minimum entre deux pièges était de 30 cm et le maximum était de 11 km. Le flux mesuré pendant ce laps de temps a été en moyenne, sur les neuf pièges, de $167 \text{ mg m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$, avec un minimum de $43 \text{ mg m}^{-2} \text{ j}^{-1}$ et un maximum de $283 \text{ mg m}^{-2} \text{ j}^{-1}$. Cette forte variation à l'échelle kilométrique des mesures de flux obtenues par la série des trois lignes de pièges regroupés a pu être observée aussi à l'échelle métrique. Ainsi, à moins d'un mètre de distance, on a pu calculer sur l'un des trois mouillages un flux moyen de $82,3 \pm 46,5 \text{ mg m}^{-2} \text{ j}^{-1}$, soit une fluctuation de plus de 50 %. Pour expliquer cette hétérogénéité dans la mesure de la masse particulaire, plusieurs hypothèses sont émises : artéfact d'échantillonnage conditionné par la structure des pièges, situations hydrologiques particulières et production (ou distribution) hétérogène des particules dans la colonne d'eau.

Oceanologica Acta, 1994. **17**, 2, 227-231.

RÉSUMÉ

Horizontal variation of the particles flux at micro- and mesoscale on the California abyssal plain (4 100 m depth)

Nine sediment traps were assembled in triplicate on a frame and deployed at 100 m above the bottom in the California abyssal plain (4 100 m depth) for ten days. The distances between traps were from 30 cm to 11 km. The main flux measured during this period was $167 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ with a minimum of $43 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ and a maximum of $283 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. This high variation of the particulate flux at the kilometeric scale was also observed at a metric scale: for example, the particulate flux measured with one of triplicate traps was equal to $82.3 \pm 46.5 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (more than 50 % of variation) between traps distant of less than 1 m. To explain this heterogeneity of the flux measurement, some hypotheses are developed in this study: sampling artefact, different hydrological conditions, heterogeneous production, or distribution of particles in the water column.

Oceanologica Acta, 1994. **17**, 2, 227,231.

INTRODUCTION

L'étude du cycle de la matière dans l'océan nécessite une connaissance précise des flux de matériel dans toute la colonne d'eau. Aussi, depuis une dizaine d'années, les

pièges à particules ont été utilisés pour récolter le matériel sédimentant vers les abysses et le flux de matière a pu être ainsi mesuré en de nombreuses régions du globe. Grâce à l'utilisation de ces appareils, il a été possible de mettre en évidence l'existence de variations, même à grande profondeur, du flux particulaire, le plus souvent liées à celles de

la production de surface (Honjo, 1982). De même, des fluctuations inter-annuelles de la pluie particulaire ont pu être observées (Deuser, 1986 ; Vangriesheim et Khripounoff, 1990). Enfin, il a été démontré qu'au flux vertical descendant pouvait être associé un flux ascendant dépendant de certaines formes de vie sur le fond (Smith *et al.*, 1989; Grimalt *et al.*, 1990).

Dans le même temps, plusieurs auteurs ont tenté de comprendre le comportement de ces pièges in situ par des simulations en laboratoire ou par faible profondeur, et d'en tirer des règles d'utilisation les plus précises possibles (voir la revue proposée par Butman, 1986 ; Baker *et al.*, 1988 ; Gust *et al.*, 1992).

Actuellement, si les limites d'application du piège à particules commencent à bien être cernées, il subsiste une interrogation majeure sur la valeur intrinsèque de la mesure apportée par cet engin. En effet, le piège à particule reste l'un des seuls appareils de mesure en océanographie dont l'étalonnage ou la calibration ne sont jamais réalisés. La précision de sa mesure et ses variations à micro- et méso-échelles restent encore des inconnues. Une mesure par profondeur, comme c'est généralement le cas dans les études océaniques, suffit-elle à décrire correctement le flux ? Les résultats des quelques intercomparaisons effectuées entre différents modèles de pièges semblent donner raison à une vision de la distribution homogène des flux particulaires en une zone donnée (Lorenzen *et al.* 1981 ; Honjo *et al.* 1992).

Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons étudié dans ce travail la variation spatiale du flux particulaire à l'échelle d'une station. Neuf pièges à particules ont été mouillés au même moment et à la même hauteur par rapport au fond à différentes distances les uns des autres, par 4 100 m de profondeur, dans la plaine abyssale de Californie. Le but principal de ce travail est d'obtenir la précision de mesure d'un piège à particule dans des conditions de mouillage données.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

La station choisie pour cette expérience se situe par 4 100 m de profondeur dans la plaine abyssale de Californie (34°50'N et 123°W).

Neuf pièges cylindro-coniques en fibre de verre, à prélèvement unique, avec une ouverture de 30 cm de diamètre et une hauteur de 1 m, ont été groupés par trois sur trois châssis en aluminium [fig. 1 a (Khripounoff et Albéric, 1991)]. Une grille en «nid d'abeille» couvre l'ouverture de chaque piège de façon à limiter les turbulences à l'intérieur du cône. Un système d'émerillon et de dérives permet de placer les trois pièges de chaque châssis toujours face au courant. Le positionnement des flacons de prélèvement sous chaque cône se fait par le déplacement d'une platine porte-bouteilles après la lyse d'un barreau de magnésium, cinq heures environ après la mise à l'eau. La fermeture de ces bouteilles est déclenchée par commande acoustique à la fin de l'expérience (fig. 1 b).

Les trois structures ont été positionnées entre le 21 juin et le 1^{er} juillet 1990 suivant une radiale Est-Ouest (station 409, la plus à l'Est et station 411, la plus à l'Ouest).

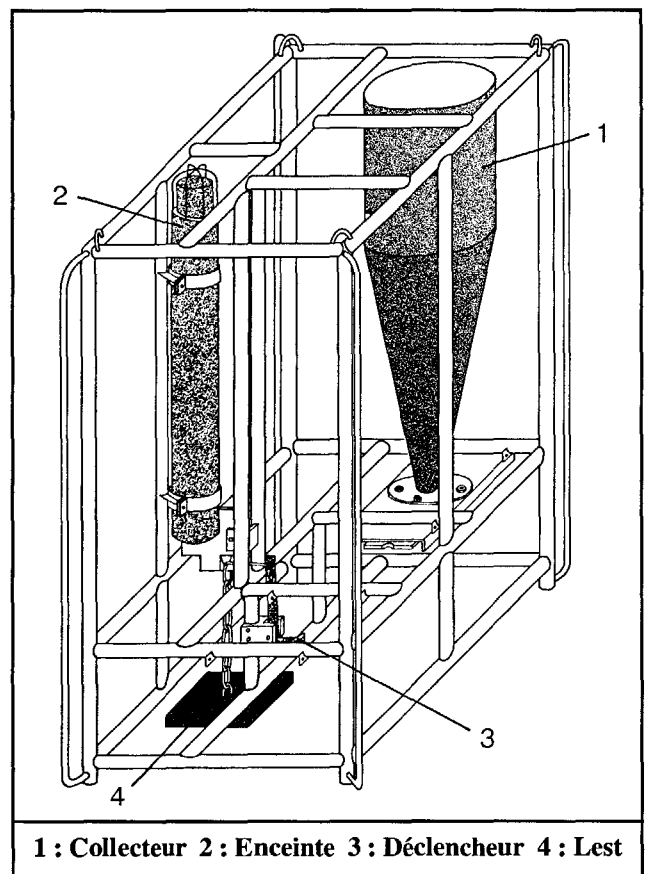


Figure 1

A : Ensemble des trois pièges à particules réunis dans une même structure (seul un piège a été représenté dans cette figure). Le lest se situait à 100 m au-dessous de la structure.

Trap frame (only one trap is shown in this figure). The anchor was at 100 m under the traps.

B : Schéma du système d'ouverture-fermeture des pièges à particules. Scheme of open-closed system used with sediment traps.

L'intervalle entre chaque groupe de pièges était d'environ 5 km, afin d'échantillonner une surface comparable à la surface des stations de mesure généralement mises en oeuvre en milieu profond. Chaque ensemble de trois pièges se situait à 100 m au-dessus du sédiment afin de le situer en dehors de la grande masse des remises en suspension. Cette hauteur, qui reste arbitraire faute de référence dans notre zone d'étude, a été choisie en fonction de nos connaissances acquises dans le golfe de Gascogne et dans l'Atlantique tropical. Ainsi, dans l'Atlantique Nord-Est, par 2 000 m de profondeur, le flux de remise en suspension n'est mesurable par piège qu'à des hauteurs inférieures à 20 m au-dessus du fond (Khripounoff et Crassous, 1994).

Un courantomètre Anderaa, associé à la ligne de mouillage de la station 411, a été fixé à 10 m au-dessus des pièges. Aucun poison n'a été ajouté dans les collecteurs des pièges, car le développement bactérien sur les particules ne pouvait être que très réduit sur une durée de prélèvement ne dépassant pas dix jours. Après la récupération des pièges, les échantillons récoltés sont conservés au congélateur.

Au laboratoire, les particules sont rincées deux fois par centrifugation avec de l'eau fraîchement distillée, puis séchées dans une étuve à vide à 60°C, et enfin pesées. Le carbone et l'azote total sont dosés à l'aide de l'auto-analyseur Carlo Erba ANA 1500. Le carbone organique est obtenu par l'auto-analyseur Leco WR 12 sur des particules préalablement décarbonatées à l'acide HCl 2N (Weliky *et al.*, 1983).

RÉSULTATS

Courant (fig. 2)

La vitesse moyenne du courant mesuré à 100 m au-dessus du fond est de 3,9 cm s⁻¹, avec un maximum de 10,9 cm s⁻¹. Le courant est affecté d'une oscillation de marée semi-diurne. La direction du courant résiduel porte vers le Nord-Ouest.

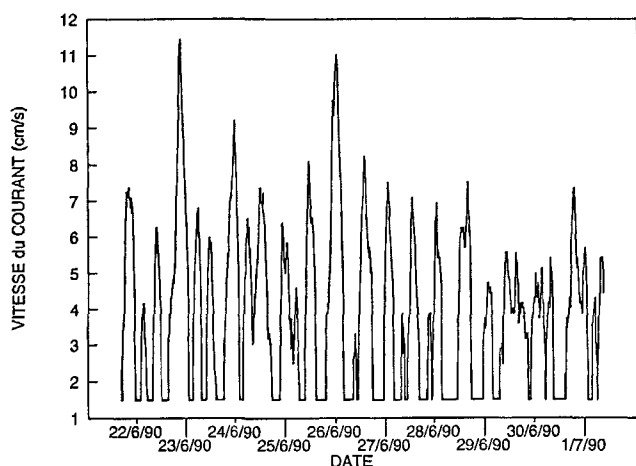


Figure 2

Vitesse du courant à 100 m d'altitude.

Current speed at 100 m above the bottom.

Particules

Les résultats du flux total mesuré par les neuf pièges ainsi que l'analyse élémentaire des particules sont résumés dans le tableau. Le flux particulaire varie de 42,29 mg m⁻² j⁻¹ à 282,86 mg m⁻² j⁻¹ au cours des dix jours de mesure, soit un facteur de variation de 1 à 7. En prenant en considération le flux mesuré dans chaque structure, soit trois pièges distants les uns des autres de moins d'un mètre, on obtient respectivement 82,3 ± 46,5 mg m⁻² j⁻¹ à la station 411, 240,0 ± 41,4 mg m⁻² j⁻¹ à la station 410, et enfin 179,6 ± 33,8 mg m⁻² j⁻¹ à la station 409. Il est remarquable de constater que l'écart-type des flux est sensiblement comparable dans toutes les stations, quelle que soit la valeur absolue du flux mesuré. En conséquence, l'hétérogénéité du flux mesuré est plus élevée à la station 411 où le flux est le plus faible (écart-type/moyenne = 0,56) que dans les stations 410 et 409 (respectivement 0,17 et 0,19).

La comparaison des résultats sur les trois stations par une analyse de variance (ANOVA à 95 % de confiance) indique une différence significative entre les flux mesurés à la station 411 et ceux obtenus à la station 410. Ces deux stations ne sont distantes l'une de l'autre que de 5 km (fig. 3).

L'ensemble des données récoltées dans cette zone permet de déduire une valeur moyenne du flux de 167,3 ± 77,5 mg m⁻² j⁻¹ soit une variation de ± 46,3 %.

La composition élémentaire des particules (tableau) ne varie pas d'une station à l'autre. Les particules récoltées dans la région sont composées en moyenne de 5,6 % de carbone organique, 0,67 % d'azote (C organique/N = 8,3) et enfin de 2,7 % de carbone minéral.

Tableau

Flux et composition élémentaire des particules récoltées dans les différents pièges à particules.

Flux and elementary composition of particles collected in the different sediment traps.

	PIÈGE NUMÉRO	FLUX TOTAL mg/m ² /j	CARBONE ORGANIQUE %	CARBONE ORGANIQUE mg/m ² /j	AZOTE %	CARBONE MINÉRAL %	C. ORG./N
Station 411	11	133,43	5,47	7,30	0,63	2,41	8,68
34°54, 18'N	12	71,29	5,49	3,91	0,65	2,57	8,45
123°01, 30'W	13	42,29	6,12	2,59	-	-	-
Station 410	21	282,86	5,42	15,33	0,66	2,56	8,21
34°51, 95'N	22	236,86	5,25	12,44	0,66	2,87	7,95
122°58, 55'W	23	200,29	5,76	11,54	0,76	3,05	7,58
Station 409	41	183,86	5,43	9,98	0,67	2,92	8,10
34°49, 89'N	42	211,14	5,58	11,78	0,63	2,33	8,86
122°56, 01'W	43	143,86	5,91	8,50	0,74	3,1	7,99

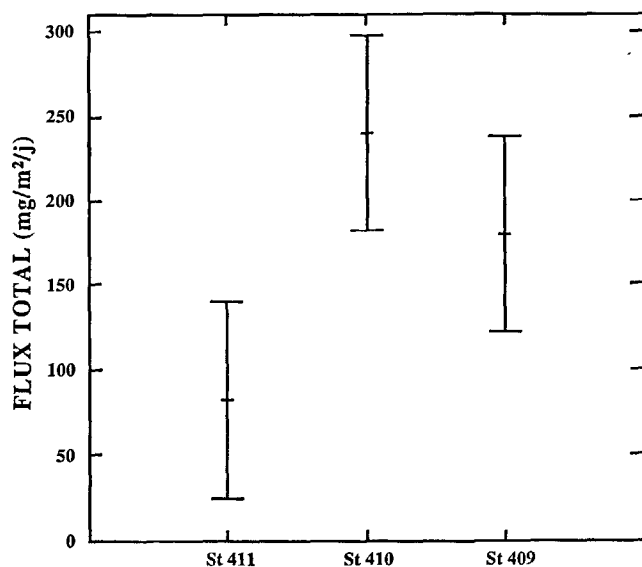


Figure 3

Représentation graphique de l'analyse de variance (ANOVA, 95 % de confiance) des flux particulaire obtenus sur les trois stations.

Graphic representation of the variance analysis (ANOVA confidence interval 95 %) of particulate flux measured at the three stations.

DISCUSSIONS

Le protocole expérimental utilisé dans cette étude permet de comparer les flux particulaires à deux échelles spatiales différentes :

- 1) Échelle métrique à l'intérieur de chaque structure (micro-échelle).
- 2) Échelle kilométrique en comparant les stations entre elles (mésos-échelle).

Variations à micro-échelle

On peut s'interroger sur l'origine des fortes variations (de 17 à 56 %) de la masse particulaire recueillie dans les pièges associés à la même structure, sachant que leurs ouvertures ne sont distantes les unes des autres que d'un mètre au maximum. La première hypothèse est que la disposition des pièges en ligne sur la structure engendre dans l'eau des turbulences locales qui peuvent perturber l'efficacité de capture de chacun des pièges (Blomqvist et Kofoed, 1981). En fait, par deux fois, le flux maximum de particules a été observé sur un piège positionné à l'extrémité de la structure. La valeur la plus faible est aussi toujours obtenue sur un piège situé en bordure. La structure étant symétrique, il est difficile d'expliquer cette différence uniquement par un problème d'orientation des pièges par rapport au courant.

La deuxième hypothèse pouvant expliquer les variations du flux au niveau de la station met en jeu le problème de l'échantillonnage représentatif du flux particulaire sur un laps de temps très court (dix jours). En effet, le flux est dominé par les plus grosses particules (« neige marine abyssale ») qui forment de larges agrégats pouvant atteindre plusieurs millimètres (Asper, 1987 ; Honjo *et al.*, 1984). Ces agglomérats organo-minéraux sédimentent

relativement rapidement malgré une densité assez faible (Mac Cave, 1975). La répartition de ces grosses particules en pleine eau ne suit pas obligatoirement une distribution homogène à l'échelle d'une surface de quelques mètres carrés. Leur échantillonnage, réalisé sur une période trop courte (ou une surface de prélèvement trop faible) ne permet pas d'intégrer toutes les irrégularités de cette distribution. Cette hypothèse peut expliquer la dispersion de nos résultats à l'intérieur de chaque structure.

Variation à méso-échelle

Le flux moyen mesuré par les neuf pièges est comparable à celui obtenu par un autre modèle de piège de plus grand diamètre d'ouverture (0,5 m²) sur la même zone et à la même période (Smith, communication personnelle). Cependant, la distance entre nos trois stations, qui varie de 5 à 11 km, a été suffisante pour placer chaque groupe de pièges dans un milieu où la sédimentation particulaire est significativement différente pendant la période de l'expérience. Plusieurs explications peuvent être avancées pour comprendre ce phénomène:

Artefact dû à des conditions hydrologiques hétérogènes

Ainsi, le courant mesuré au-dessus des pièges à la station 411 présente quelques pulsions de forte intensité (maximum 11,8 cm/s orientées au Nord-Ouest). L'effet de l'intensité des courants sur l'efficacité de prélèvement des pièges reste encore très discuté. Pour Baker *et al.* (1988), à l'élévation de la vitesse du courant correspond une diminution proportionnelle du rendement des pièges. Par contre, Gardner (1985) signale une augmentation de la collecte des particules en fonction de l'inclinaison des pièges. Quoi qu'il en soit, si le courant subi par les pièges n'a pas été similaire sur toute la zone d'étude à un certain moment, le comportement des pièges a pu être différent.

Situation topographique ou/et hydrologique locale

La présence de collines ou de dépressions peut engendrer des conditions hydrologiques particulières qui vont jouer soit sur la distribution des particules pélagiques, soit sur la distribution des remises en suspension, les deux phénomènes pouvant se produire en parallèle. Ce phénomène, déjà signalé en Méditerranée (Crassous *et al.*, 1991), est la cause de nombreuses variations locales des flux particulaires. Dans notre cas, la concentration en carbone organique des particules (en moyenne égale à 5,6 %) fluctue peu entre les pièges et correspond à celle des particules d'origine pélagique récoltées à cette profondeur. Les remises en suspension de sédiment, caractérisées par une faible concentration en carbone organique (Walsh *et al.*, 1988), ne sont pas à l'origine des variations de flux observé.

Distribution hétérogène de la source de particules ou dispersion non homogène au cours de la sédimentation

Il n'est plus à démontrer que la production primaire phytoplanctonique ainsi que la distribution zooplanctonique de surface fluctuent constamment dans l'espace et le temps et particulièrement en période de bloom printanier (période où ont été mouillés les pièges de cette expérience). La dis-

tribution du matériel détritique produit par ces organismes en surface doit naturellement suivre la distribution hétérogène de la source des particules. Par la suite, le passage du flux particulaire dans la colonne d'eau suffit-il à homogénéiser cette pluie de particules au voisinage du fond ? A l'heure actuelle, la question reste posée. La présence de tourbillons pouvant être actifs sur de grandes profondeurs ne plaide pas pour cette hypothèse (Richardson *et al.*, 1979).

Durant la sédimentation, les particules subissent des phénomènes de désagrégation-agrégation sous l'action biologique : désagrégation par activité bactérienne et agglomération des fines particules sous forme de pelotes fécales zooplanctoniques (Alldredge et Mac Gillivray, 1991 ; Riebesell et Wolf-Gladrow, 1992). Ces phénomènes peuvent aussi fluctuer rapidement au cours du temps et en profondeur, accentuant ainsi l'hétérogénéité spatiale du flux.

En conclusion, cette expérience, très ponctuelle et limitée dans le temps, avait pour objet initial de donner une estimation de la précision de la mesure du flux près du fond à un moment donné (période de floraison phytoplancton-

nique) dans une zone abyssale standard. Bien que très localisée géographiquement, cette expérience nous oblige à nous interroger sur la possibilité de décrire finement des fluctuations à court terme du flux particulaire en rapport avec des phénomènes rapides biologiques (activités et migrations planctoniques) ou physiques (courant de marée, pulsion de courant). En effet, ce type d'expérience oblige à réduire au maximum le pas d'échantillonnage des pièges à particules. Les résultats présentés dans ce travail indiquent clairement la prudence qu'il faut garder à l'esprit dans l'interprétation de tels résultats si ceux-ci ne sont pas obtenus simultanément avec plusieurs pièges.

Remerciements

Nous remercions particulièrement Ken L. Smith Jr. pour son invitation à participer à la campagne Pulse 4. Nous remercions également J. Baldwin, J. Edelman et B. Wilson ainsi que l'équipage du R/V *Washington* pour leur aide pendant le déploiement des pièges.

RÉFÉRENCES

- Alldredge A.L. et P. Macgillivray (1991). The attachment probabilities of marine snow and their implications for particle coagulation in the ocean. *Deep-Sea Res.*, **38**, 431-443.
- Asper V.L. (1987) Measuring the flux and sinking speed of marine snow aggregates. *Deep-Sea Res.*, **34**, 1-17.
- Baker E.T., H. Milburn et D. Tennant (1988). Field assessment of sediment trap efficiency under varying flow conditions. *J. mar. Res.*, **46**, 573-592.
- Blomqvist S. et C. Kofoed (1981). Sediment trapping : a subaquatic in situ experiment. *Limnol. Oceanogr.*, **26**, 585-590.
- Butman C.A. (1986). Sediment trap biases in turbulent flows : results from a laboratory flume study. *J. mar. Res.*, **44**, 645-693.
- Crassous P., A. Khripounoff, J. La Rosa et J.-C. Miquel (1991). Remises en suspension sédimentaires observées en Méditerranée par 2 000 m de profondeur à l'aide de pièges à particules. *Oceanologica Acta*, **14**, 2, 115-121.
- Deuser W.G. (1986). Seasonal and interannual variations in deep-water particle fluxes in the Sargasso Sea and their relation to surface hydrography. *Deep-Sea Res.*, **33**, 225-246.
- Gardner W.D. (1985) The effect of tilt on sediment trap efficiency. *Deep-Sea Res.*, **32**, 349-361.
- Grimalt J.O., B.R.T Simoneit., J.I. Gomez-Belinchon, K. Fischer et J. Dymond (1990). Ascending and descending fluxes of lipid compounds in North Atlantic and North Pacific abyssal waters. *Nature*, **345**, 147-150.
- Gust G., R.H. Byrne, R.E. Bernstein, P.R. Betzer et W. Bowles (1992). Particle fluxes and moving fluids : experience from synchronous trap collections in the Sargasso Sea. *Deep-Sea Res.*, **39**, 1071-1083.
- Honjo S. (1982). Seasonality and interaction of biogenic and lithogenic particulate flux at the Panama Basin. *Science*, **218**, 883-884.
- Honjo S., K.W. Doherty, Y.C. Agrawal et V.L. Asper (1984). Direct optical assessment of large amorphous aggregates (marine snow) in the deep ocean. *Deep-Sea Res.*, **31**, 67-76.
- Honjo S., D.W. Spencer et W.D. Gardner (1992). A sediment trap intercomparison experiment in the Panama Basin, 1979. *Deep-Sea Res.*, **39**, 333-358.
- Khripounoff A. et P. Albéric (1991). Settling of particles in a hydrothermal vent field (East Pacific Rise 13°N) measured with sediment traps. *Deep-Sea Res.*, **38**, 729-744.
- Khripounoff A. et P. Crassous (1994). Particulate material degradation in sediment traps at 2 000 m depth on the Meriadzeck Terrasse (Bay of Biscay). *Deep-Sea Res.*, **41**, 821-829.
- Lorenzen C.J., N.A. Welschmeyer, A.E. Copping et M. Vernet (1983). Sinking rates of organic particles. *Limnol. Oceanogr.*, **28**, 766-769.
- McCave I.E. (1975). Vertical flux of particles in the ocean. *Deep-Sea Res.*, **22**, 491-502.
- Richardson P.L., C. Maillard et T.B. Sanford (1979). The physical structure and life history of cyclonic Gulf Stream ring Allen. *J. geophys. Res.*, **84**, 7727-7741.
- Riebesell U. et D.A. Wolf-Gladrow (1992). The relationship between physical aggregation of phytoplankton and particle flux : a numerical model. *Deep-Sea Res.*, **39**, 1085-1102.
- Smith K.L., P.M. Williams et E.M.R. Druffel (1989). Upward fluxes of particulate organic matter in the deep North Pacific. *Nature*, **337**, 724-726.
- Vangriesheim A. et A. Khripounoff (1990). Near-bottom particle concentration and flux : temporal variations observed with sediment traps and nephelometer on the Meriadzeck Terrace, Bay of Biscay. *Prog. Oceanogr.*, **22**, 103-116.
- Walsh I., K. Fischer, D. Murray et J. Dymond (1988). Evidence for resuspension of rebound particles from near-bottom sediment traps. *Deep-Sea Res.*, **35**, 59-70.
- Weliky K., E. Suess, C. Ungere, P. Muller et K. Fischer (1983). Problems with accurate carbon measurements in marine sediments and water column particulates : a new approach. *Limnol. Oceanogr.*, **28**, 1252-1259.