

Étude des spectres de taille des particules en suspension dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent

I. Variations spatiales

S. A. POULET^{**}, J.-P. CHANUT^a, M. MORISSETTE^a

^a Laboratoire Océanologique de Rimouski (INRS; UQAR), 310 Ursulines, Rimouski, Québec G5L 3A1, Canada.

* Adresse actuelle : CNRS, Station Biologique, 29211 Roscoff, France.

Reçu le 15/1/85, révisé le 21/11/85, accepté le 4/12/85.

RÉSUMÉ

Des analyses en composantes principales ont été effectuées sur 1202 échantillons récoltés dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent en avril/mai et en septembre 1974 et préalablement mesurés au compteur de Coulter, modèle TA. Cinq groupes différents de spectres de particules, définis par leurs tailles (1-200 μm) et leurs concentrations, ont été mis en évidence dans des masses d'eau identifiées selon leurs caractéristiques thermo-halines. Les spectres des groupes 1 et 2 sont associés à des eaux saumâtres, ceux des groupes 4 et 5 sont d'origine marine, tandis que ceux du groupe 3 sont observés dans des eaux de salinité intermédiaire. Ces cinq groupes présentent des variations de forme, subdivisées en 13 sous-groupes, dont l'hétérogénéité augmente des groupes 1 à 5 en fonction de la salinité croissante. La transformation des spectres peut être continue ou discontinue, suivant le degré de cloisonnement hydrologique des masses d'eau. Les particules les plus fines du groupe 3 sont cosmopolites et peuvent servir de continuum à l'interface des eaux estuariennes et marines dans tout le Saint-Laurent.

Oceanol. Acta, 1986, 9, 2, 179-189.

ABSTRACT

Size spectra of particles in the estuary and Gulf of Saint Lawrence. I. Variations with space

Among 1202 samples of suspended matter within the 1-200 μm size range, measured with a Coulter counter in April/May and September 1974 in the estuary and gulf of Saint Lawrence, 5 groups of particle size spectra were identified by principal component analysis. Particle spectra in groups 1, 2 and 3 were observed in estuarine waters, whereas particles in groups 4 and 5 were observed in marine waters. From the variations detected within or among the 5 groups it is assumed that particles in group 3 are probably intermediate between particles of estuarine and marine origins.

Oceanol. Acta, 1986, 9, 2, 179-189.

Contribution du laboratoire INRS-Océanologie, Rimouski.

INTRODUCTION

Les particules en suspension forment une fraction importante ($\sim 1/3$) d'après Cauwet (1978) de la masse totale de la matière organique évaluée dans le domaine marin, tandis que plus de 70% est sous forme inorganique (Wangerski, 1965). L'étude de leurs propriétés physico-chimiques et de leurs répartitions spatio-temporelles est particulièrement nécessaire, compte tenu

de leur implication dans les processus sédimentologiques, biogéochimiques et biologiques. En outre, les particules en suspension sont un des éléments essentiels des échanges terre-mer. Ces interactions sont particulièrement intenses en zones estuariennes et côtières où les courants de marée jouent un rôle prépondérant dans la dynamique des particules (entre autres : Postma, 1967; Schubel, 1971; D'Anglejan, Ingram, 1976; Gobeil *et al.*, 1981). Souvent considérées par le biais de la

concentration uniquement, la dynamique et la distribution en tailles (spectres) des particules sont peu étudiées dans ces milieux. Pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, on possède des informations sectorielles relatives à ce paramètre (D'Anglejan, Smith, 1973; Sundby, 1974; Cossa, Poulet, 1978; Kranck, 1979; Chanut, Poulet, 1982), mais il n'existe pas à notre connaissance, d'observations globales portant sur l'ensemble du système. L'estuaire et le golfe du Saint-Laurent forment un immense complexe hydrologique dont les caractéristiques topographiques et hydrologiques ont été décrites, entre autres, par Forrester (1964), Trites (1972), Loring et Nota (1973), d'Anglejan et Smith (1973) et par El-Sabh (1976; 1979). Il a été montré que des processus physiques, biologiques et biogéochimiques impliqués dans la dynamique des particules, généralement décrits dans des zones estuariennes (*cf.* revue par Martin, Meybeck, 1979; Riaux, Douvillé, 1980; Gobeil *et al.*, 1981), se rencontrent en divers secteurs du Saint-Laurent (Sundby, 1974; d'Anglejan, Ingram, 1976; Therriault, Lacroix, 1976; Loring, 1979; Silverberg, Sundby, 1979; Gobeil *et al.*, 1981; Chanut, Poulet, 1982).

Le but de cette étude est de décrire les formes des spectres des particules en suspension, leurs variations et leur répartition dans l'ensemble du Saint-Laurent. Il s'agit d'une approche globale faisant partie d'une étude multidisciplinaire des particules de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (Cossa, Poulet, 1978; Chanut, Poulet, 1979; 1982; Poulet *et al.*, 1986).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Zones et époques d'échantillonnage

Une série de 53 stations réparties dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Québec, Canada), fut étudiée

en 1974 à deux époques de l'année : au printemps, du 29 avril au 15 mai (stations 1-89; chiffres droits) et en été/automne, du 18 au 27 septembre (stations 9-61; chiffres en italique; fig. 1). Les observations recueillies dans le fjord du Saguenay, la même année, au cours de ces deux campagnes ont déjà été publiées (Cossa, Poulet, 1978; Chanut, Poulet, 1979). Cette étude globale a conduit à décrire la répartition des particules en suspension selon une vaste échelle spatiale, en relation avec les facteurs hydrologiques classiques (salinité, température).

Prélèvements et analyses

Les échantillons d'eau ont été prélevés avec des bouteilles Niskin de 5 ou 30 litres, tandis que les mesures de la température et de la salinité ont été effectuées *in situ* à l'aide d'une sonde CSTD (modèle General Oceanic), calibrée au moyen de thermomètres à renversement. Toute la colonne d'eau (0-490 m) a été échantillonnée entre Québec et le détroit de Cabot (fig. 1, 2). Au total, 1202 échantillons ont été récoltés et analysés à bord du navire dans un délai de 20 à 180 minutes, postérieur à la prise d'eau, à l'aide d'un compteur de Coulter, modèle TA. Le nombre et le volume des particules furent mesurés dans l'intervalle de taille compris entre 1 et 200 μm , divisé en 25 classes définies par leur diamètre équivalent à celui d'une sphère, selon la méthode de calibration standard (Sheldon, Parsons, 1967). Les analyses furent réalisées avec des tubes de 50 et 280 μm ou 400 μm de diamètre d'orifice selon les méthodes de Sheldon et Parsons (1967) et de Sheldon (1969). Après traitement informatique, les 32 classes de taille obtenues à partir des 2 tubes utilisés pour chaque échantillon ont été ramenées à 25 classes par suite du recouvrement partiel du champ

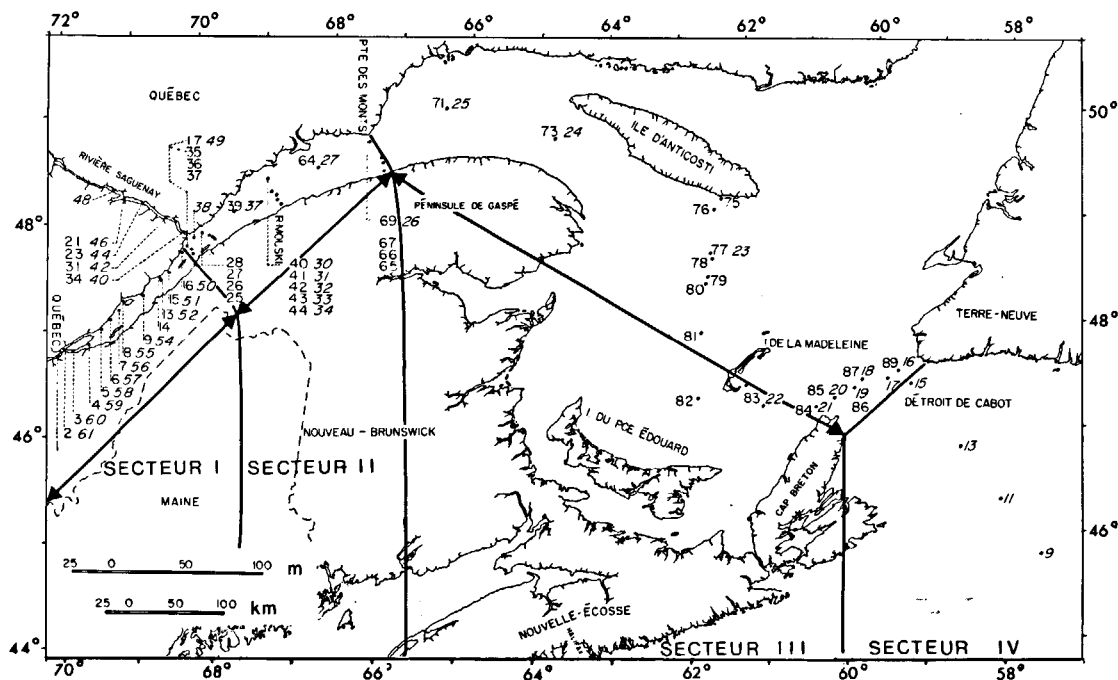
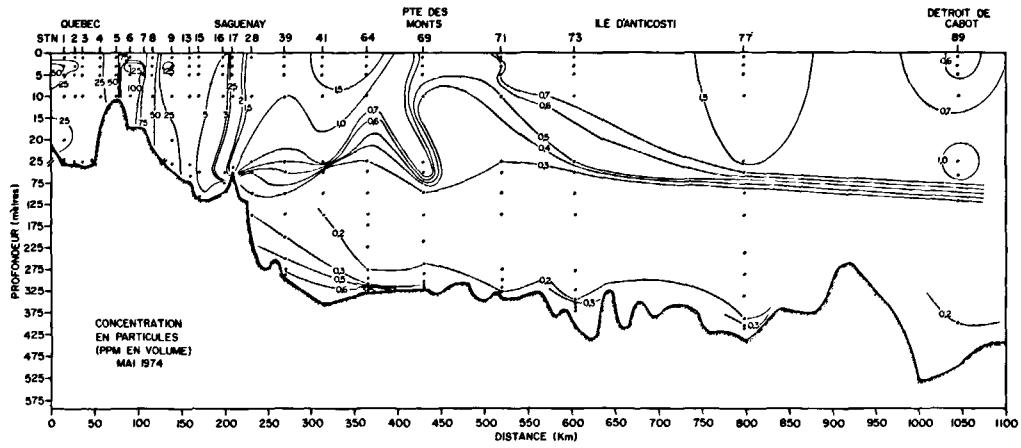


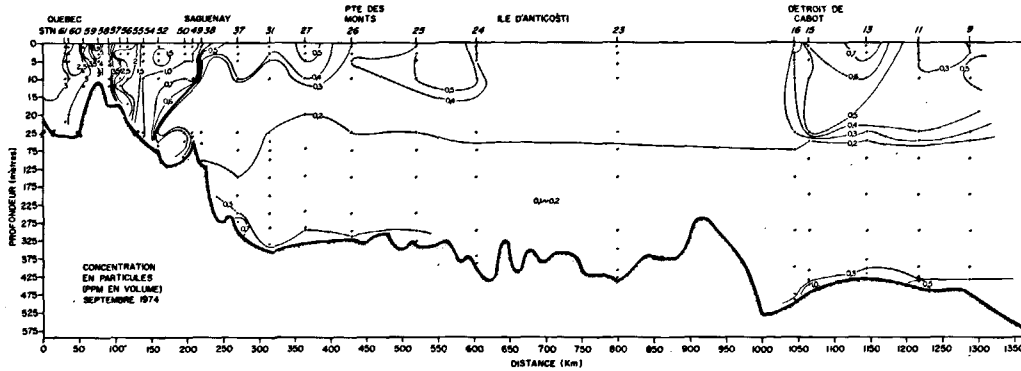
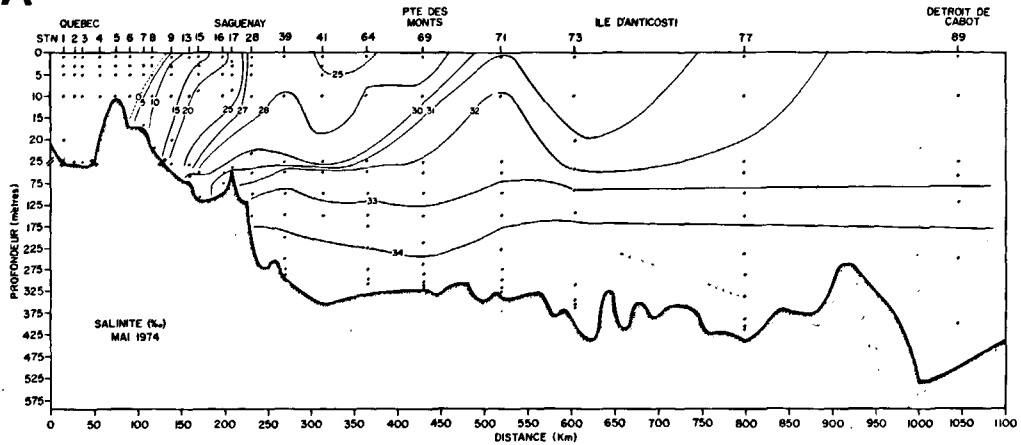
Figure 1

Localisation des stations occupées dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent (Québec, Canada) en avril-mai (chiffres droits) et en septembre (chiffres en italique) 1974. Secteur I : estuaire supérieur; Secteur II : estuaire maritime; Secteur III : golfe; Secteur IV : extérieur du golfe.

Location of stations in the estuary and gulf of Saint Lawrence (Quebec, Canada) in April-May (normal figures) and in September (italic figures) 1974. Secteur I : upper estuary; secteur II : lower estuary; secteur III : gulf; secteur IV : external gulf section.



A



B

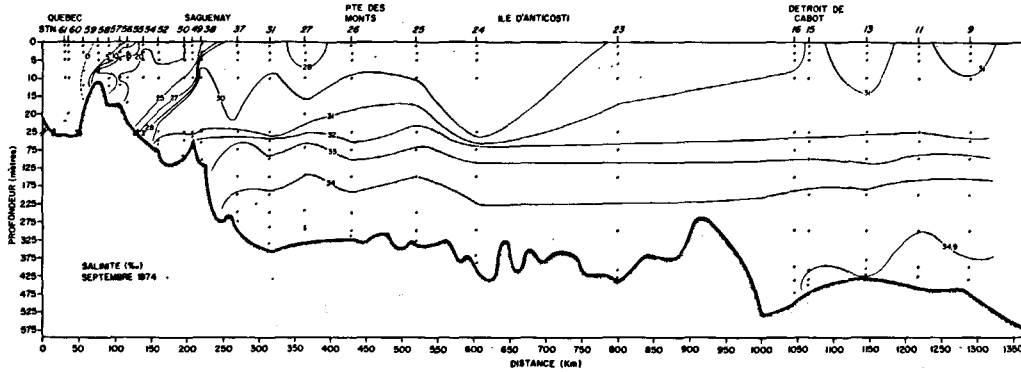


Figure 2

Répartitions verticale et longitudinale de la concentration totale des particules (ppm) et de la salinité dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent : en avril-mai (A), en septembre (B). Pour la définition des secteurs, voir la Figure 1.

Variations of particle concentration (ppm) and salinity in the estuary and gulf of Saint Lawrence in April-May (A) and in september (B). I to IV as in Figure 1.

d'investigation des 2 tubes. Dans la zone de recouvrement, les résultats sont souvent divergeants et peuvent atteindre 30% d'écart d'un tube à l'autre. L'écart est d'autant plus faible (< 10%) que la calibration des tubes est bonne. Pour minimiser cet inconvénient technique, les données retenues sont, par convention, les moyennes arithmétiques des valeurs obtenues avec les deux tubes dans chacune des 7 classes de taille appartenant à la zone de recouvrement. Tous les échantillons furent tamisés avec des tamis de soie Nitex de 50 μm de vide de maille avant le comptage sur le tube de 50 μm ; et avec des tamis de 202 μm dans le cas des tubes de 280 et 400 μm afin d'éviter le colmatage des orifices. Dans la majorité des cas (90%), les observations ont été effectuées en simple exemplaire, sans aucun traitement préalable à l'exception du tamisage. La précision des mesures est évaluée à 5% pour la concentration totale des particules et à 15% en ce qui concerne celle des classes de taille > 150 μm .

Dans l'estuaire supérieur du Saint-Laurent, la forte turbidité des eaux nous a conduits à diluer les échantillons pour éviter des mesures erronées dues aux coïncidences des particules dans l'orifice des tubes (Sheldon, Parsons, 1967). Les sous-échantillons d'eau prélevés à la pipette (5, 10, 50 ou 100 ml, selon la turbidité rencontrée) furent dilués avec un électrolyte (eau bidistillée enrichie de 25 g.l^{-1} de NaCl, préalablement filtrée deux fois sur Millipore 0,22 μm) et ajustés avec cet électrolyte, à volume constant, dans une fiole jaugée de 250 ml. Les données du compteur de Coulter furent ultérieurement corrigées pour tenir compte du facteur de dilution. L'échantillon était manuellement agité et immédiatement analysé. Cette procédure ne semble pas modifier le spectre de taille des particules (Troude, 1975). Les canaux 1 et 2 du compteur (intervalle 0,8-1,2 μm), où l'on détecte le maximum de bruit de fond de source électronique ou relié à cet électrolyte (équivalent à 8-10 particules. ml^{-1}), furent éteints dans la majorité des comptages afin d'éliminer les parasites, donnant lieu ainsi à des spectres comportant 23 classes de taille de particules.

Les données brutes sont exprimées en terme de concentration partielle (ppm ou $10^6 \mu\text{m}^3. \text{ml}^{-1}$) pour les 23 classes de particules retenues dans l'étude, et en terme de concentration totale, correspondant à la somme des concentrations partielles. Les spectres de taille des particules, figurés sur une échelle log-log uniformisée, représentent la concentration partielle en fonction de la taille des 23 classes de particules dans l'intervalle 1-200 μm .

Traitement statistique

Des ensembles de 50 à 100 échantillons (spectres de taille des particules) ont été traités par l'analyse factorielle en composantes principales (ACP) dont l'application aux particules a été décrite en détails par Kitchen *et al.* (1975), Chanut *et al.* (1977), et Chanut et Poulet (1982). Les valeurs initiales des concentrations de particules furent transformées en valeurs logarithmiques avant le traitement statistique. L'analyse de chaque matrice de données (23 classes \times N spectres) a été réalisée avec le logiciel SPSS (Nie *et al.*, 1975).

Une grande disparité entre les minima et les maxima de concentration des particules d'un spectre à l'autre est présente dans les données initiales. La transformation logarithmique de telles données est alors nécessaire afin de rendre les effets additifs et de stabiliser les variances associées à ces effets. Ainsi, les valeurs initiales des concentrations de particules ont été transformées en valeurs logarithmiques avant d'être soumises à l'analyse statistique. L'analyse des données a été effectuée initialement sur les variables centrées et centrées réduites. Dans les deux cas, la disposition relative des points représentant les spectres dans les premiers plans factoriels s'est avérée très semblable, provenant sans doute du fait que toutes les variables (classes de taille) ont les mêmes unités de mesure. En fait, une telle normalisation n'agit pas sur la forme des distributions mais seulement sur leur poids, c'est-à-dire leur concentration totale. Or, pour chacune des analyses portant sur une centaine de spectres provenant d'une région déterminée, les niveaux de concentration totale des particules ne changent pas radicalement d'un spectre à l'autre. Toutefois, afin de donner la même importance aux différents caractères (classes de taille) dans le calcul des distances entre spectres, l'analyse a été effectuée sur les données centrées et centrées réduites. Les axes principaux sont engendrés par les vecteurs propres de la matrice de corrélation.

Dans bien des cas, les deux ou trois premiers axes principaux permettent de prendre en compte plus de 80 à 90% de la variabilité totale présente dans le nuage de points. Si bien que la représentation graphique du nuage de points obtenus par projection orthogonale de ce nuage dans le plan formé par les deux premiers axes principaux fournit une « bonne » visualisation de l'ensemble des points. Dans ce type de représentation, des spectres semblables seront représentés par des points voisins et inversement, des points éloignés correspondent à des spectres dissemblables. Dans cette visualisation du nuage de points, des sous-ensembles de points sont décelés et identifiés en tant que groupes. La définition de chaque groupe 1 à 5 (fig. 3), regroupant des spectres semblables, est basée sur un critère objectif statistique et sur un critère visuel correcteur. Dans la majorité des cas, les enveloppes délimitent des points (spectres) dont les coordonnées x_i et y_i par rapport aux axes principaux F_j ($j=1, 2$) sont < ou > à $\pm 0,5$ (cf. fig. 3). Un réajustement de l'enveloppe est parfois effectué par l'examen visuel de chaque spectre de l'ensemble traité, ce qui permet en outre de vérifier que les spectres voisins, d'un même groupe ou des divers groupes, sont semblables et que les spectres éloignés sont différents. Ces diverses propriétés de l'ACP, appliquées aux particules, ont été utilisées pour discriminer les échantillons; ce qui a permis la description et la comparaison synthétiques, et objectives des variations des spectres à diverses échelles spatio-temporelles.

Le degré de similarité des spectres à l'intérieur de chaque groupe et entre les groupes a été testé au moyen de la statistique D_{max} de Kolmogorov-Smirnov (Conover, 1980) telle que :

$$D_{nm}(x) = |F_n(x) - G_m(x)|$$

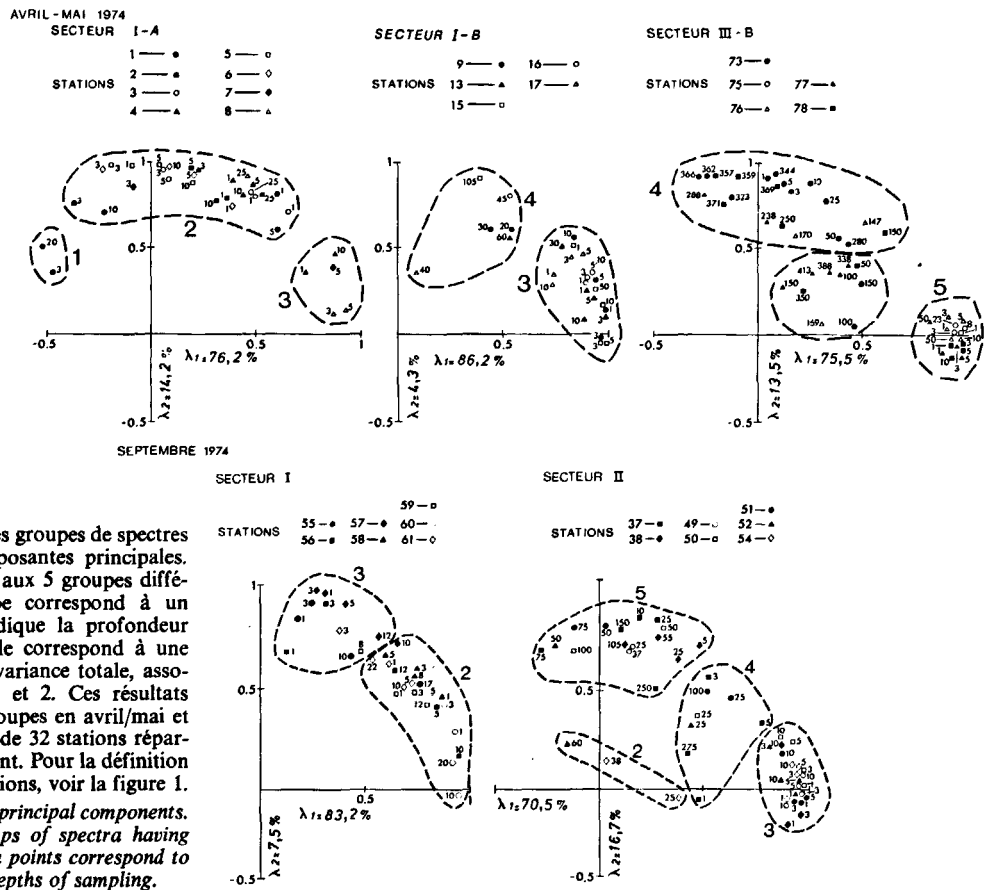


Figure 3
 Mise en évidence et différenciation des groupes de spectres de particules par l'analyse en composantes principales. Les enveloppes 1 à 5 correspondent aux 5 groupes différents. Chaque point de l'enveloppe correspond à un spectre dont le numéro associé indique la profondeur d'échantillonnage et dont le symbole correspond à une station. λ_1 ; λ_2 : pourcentages de la variance totale, associés aux composantes principales 1 et 2. Ces résultats d'ACP illustrent la présence de 5 groupes en avril/mai et de 4 groupes en septembre, à partir de 32 stations réparties en divers secteurs du Saint-Laurent. Pour la définition des secteurs et la localisation des stations, voir la figure 1.
 Plot of spectra versus first and second principal components. Numbers 1 to 5 correspond to groups of spectra having similar shapes. In each envelope, data points correspond to stations and numbers correspond to depths of sampling.

et

$$D_{\max} = \max D_{nm}(x),$$

où $F_n(x)$ et $G_m(x)$ sont les distributions empiriques de fréquence cumulée associées aux deux spectres de taille des particules contenant respectivement N classes de taille (Chanut, Poulet, 1982). Cette statistique a été calculée à l'aide du logiciel SPSS (Hull, Nie, 1981).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Variations de la concentration totale des particules

Aux échelles spatio-temporelles considérées ($\geq 10-100$ km; ~ 4 mois), les distributions géographique et bathymétrique des concentrations des particules sont extrêmement hétérogènes (fig. 2). L'amplitude des concentrations est de 0,1-250 ppm. Ces valeurs ne sont pas surprenantes, compte tenu de l'ampleur du Saint-Laurent et de l'hétérogénéité des milieux étudiés entre l'amont de l'estuaire (Québec, fig. 1, 2) et la sortie du golfe (détroit de Cabot, fig. 1, 2). Localement en chaque secteur, les concentrations maximales sont observées respectivement, au printemps, dans la couche d'eau superficielle (0-25 m) et dans la zone de turbidité maximum localisée dans l'estuaire supérieur (stations 4 à 9 et 59 à 64; fig. 2). Les concentrations les plus faibles sont observées en été/automne. Schématiquement, il existe un gradient de turbidité décroissant entre les zones amont et aval de l'estuaire, entre l'estuaire et le golfe et entre la couche superficielle (< 25 m) et la partie inférieure de la colonne d'eau. Ce schéma général

est perturbé dans tout secteur influencé soit par l'apport d'eaux douces, soit par la remise en suspension des particules dans la zone de turbidité maximum et à proximité du fond (couche néphéloïde) due à la marée. Nos résultats sont conformes aux descriptions antérieures établies en divers secteurs de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent (D'Anglejan, Smith, 1973; Sundby, 1974; Troude, 1975; Cossa, Poulet, 1978; Kranck, 1979; Silverberg, Sundby, 1979; Gobeil *et al.*, 1981; Chanut, Poulet, 1982).

Variations inter-groupes

L'étude des particules par l'ACP a mis en évidence 5 groupes distincts de spectres de particules (fig. 3). Ce petit nombre contraste fortement avec le nombre initial de spectres échantillonnés et l'immensité du système considéré. Les résultats de la figure 3 illustrent la méthode de mise en évidence des différentes catégories de spectres par l'ACP (Chanut, Poulet, 1982). Les composantes principales 1 et 2 suffisent, en général, à prendre en compte plus de 80% de la variabilité totale ($\sum \lambda_i$) des échantillons. Les enveloppes numérotées 1, 2, 3, 4 et 5 correspondent aux 5 groupes de spectres identifiés statistiquement par leur position relative dans le plan factoriel et par leur forme réelle, vérifiée visuellement dans l'échantillon initial. Le test de Kolmogorov-Smirnov a permis de vérifier et de quantifier la différence des distributions des particules entre les divers groupes (tab. 1).

Tous les 1202 échantillons mesurés au compteur de Coulter ont pu être classés parmi l'un des 5 groupes différenciés par l'ACP et illustrés dans la figure 3. Les groupes de spectres en avril/mai et en septembre sont

Tableau 1

Variations inter-groupes des spectres de taille des particules en suspension. Pour chacun des couples de spectres faisant l'objet d'un test bilatéral de Kolmogorov-Smirnov, la première station mentionnée correspond au 1^{er} groupe mentionné, la deuxième station au 2^e groupe. Seuils de signification de $|D_{max}|$, avec $n=m=23$ (Conover, 1980) : $Prob(|D_{max}| > 0,391) = 0,05$; $Prob(|D_{max}| > 0,478) = 0,01$.

Variations of particle size spectra among samples belonging to different groups. In each set of 2 spectra compared, using Kolmogorov-Smirnov's test, first and second samples are given by station numbers; depth is in brackets. Degree of freedom of $|D_{max}|$ with $n=m=23$ (Conover, 1980): $Prob(|D_{max}| < 0.391) = 0.05$; $Prob(|D_{max}| > 0.478) = 0.01$.

No Groupes (No Fig.)	No Stations (Prof. (m))	$ D_{max} $	Pr ($D_{nm} \geq D_{max} $)
Avril-mai 1974			
1-2 (3)	1 (3) - 1 (10)	0,565	0,001
1-2 (3 et 4)	1 (20) - 3 (1)	0,478	0,010
2-3 (3)	3 (1) - 7 (5)	0,783	0,000
»	1 (5) - 8 (1)	0,609	0,000
3-4 (3)	9 (10) -16 (45)	0,826	0,000
»	17 (1) -13 (60)	0,565	0,001
3-4 (4)	41 (25) -40 (100)	0,435	0,026
4-5 (3)	78 (150)-76 (5)	0,826	0,000
»	76 (147)-76 (3)	0,739	0,000
4-5 (3 et 4)	78 (150)-75 (8)	0,826	0,000
»	77 (413)-75 (8)	0,739	0,000
Septembre 1974			
2-3 (3)	60 (5) -61 (3)	0,348	0,124
»	54 (25) -38 (1)	0,381	0,059
»	54 (38) -38 (3)	0,478	0,010
2-3 (3 et 4)	57 (10) -56 (3)	0,435	0,026
2-3 (4)	57 (10) -52 (1)	0,522	0,004
3-4 (3)	52 (3) -37 (5)	0,522	0,004
»	50 (1) -51 (25)	0,381	0,059
2-4 (3)	54 (25) -37 (1)	0,522	0,004
2-5 (3)	54 (38) -37 (250)	0,609	0,000
3-5 (3)	52 (3) -38 (25)	0,696	0,000
4-5 (3)	51 (100)-38 (25)	0,478	0,010

identiques (fig. 3). Les spectres représentatifs ont été sélectionnés (fig. 4) et présentent les particularités suivantes. La différenciation entre les spectres 1 et 2 (fig. 4) est caractérisée par la variation spectaculaire de la concentration de toutes les grosses particules de taille $> 30 \mu\text{m}$. La variation affecte à un degré moindre

les particules de taille $< 20 \mu\text{m}$. La différenciation entre les spectres 2 et 3 (fig. 4) est associée à la variation des concentrations des particules de $5 \text{ à } 50 \mu\text{m}$; les particules fines ($< 5 \mu\text{m}$) n'interviennent que faiblement. La différenciation entre les groupes 3 et 4 (fig. 4) est liée à quatre facteurs :

- a) la variation de la concentration des particules fines ($< 10 \mu\text{m}$);
 - b) le déplacement du mode de $3 \text{ à } 10 \mu\text{m}$;
 - c) la variation des concentrations des grosses particules ($40\text{-}150 \mu\text{m}$) et
 - d) le glissement du mode de $40 \text{ à } 90 \mu\text{m}$.
- La différenciation entre les spectres 4 et 5 (fig. 4) est attribuée à la variation des concentrations et des modes des particules dont les tailles sont inférieures ou supérieures à la classe de $20 \mu\text{m}$. Le test de Kolmogorov-Smirnov réalisé sur des couples de spectres (fig. 3 et 4) appartenant à des groupes distincts, démontre que ces spectres sont significativement différents les uns des autres (tab. 1).

La description des groupes effectuée dans l'ordre successif 1-2, 2-3, 3-4 et 4-5 est arbitraire. La variation inter-groupes pose le problème de la transition entre les spectres (i.e. perte ou addition de particules, change-

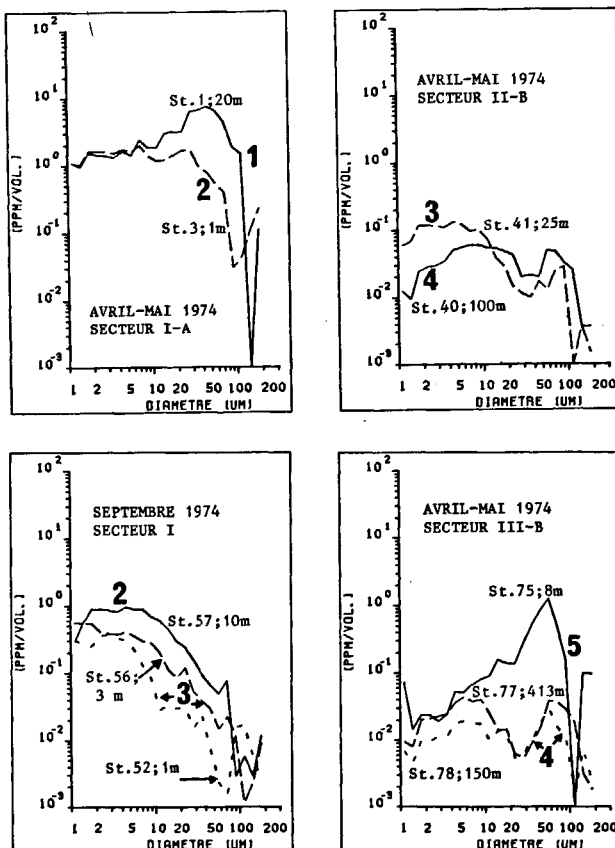


Figure 4

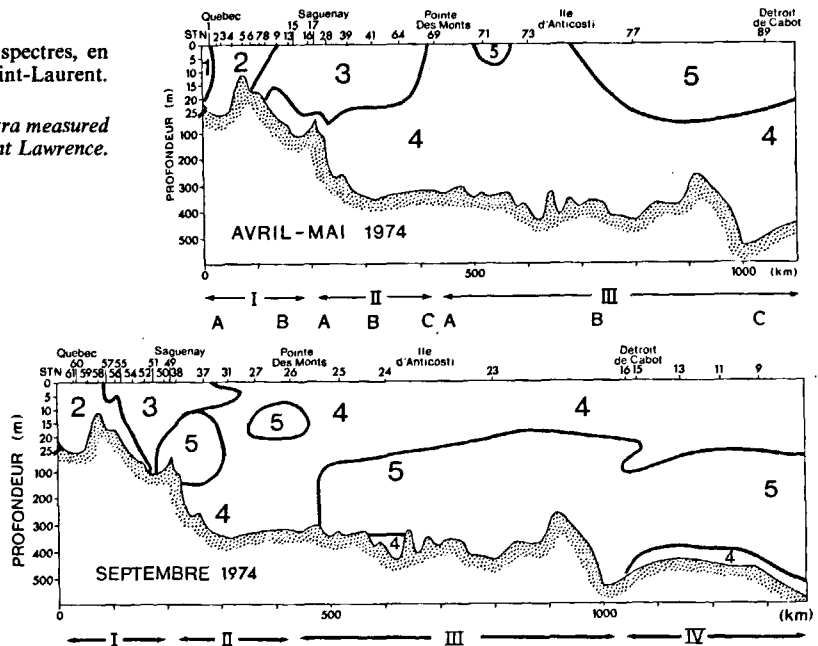
Spectres de particules représentatifs des variations inter-groupes. Echelle log-log. Chaque chiffre identifie un groupe de spectres discriminé par l'ACP telle qu'illustrée dans la figure 3. La station (st) et la profondeur (m) sont données pour chaque spectre. Pour la définition des secteurs et la localisation des stations, voir la figure 1. Dans chaque spectre, les 23 classes mesurées correspondent aux diamètres (μm) suivants : 1,26-1,58-2-2,51-3,17-4-5,03-6,33-8-10,05-12,67-16-20,12-25,35-32-40,24-50,70-64-80,48-101,40-128-160,95-180.

Particle size spectra: particle concentration versus particle diameter plotted on a log-log scale. Station number (st) and depth (m) are given for each spectrum. Each group is identified by a number, 1 to 5. In each spectrum, 23 particle size categories (μm) were measured at: 1.26-1.58-2-2.51-3.17-4-5.03-6.33-8-10.05-12.67-16-20.12-25.35-32-40.24-50.70-64-80.48-101.40-128-160.95-180.

Figure 5

Répartition verticale et longitudinale des 5 groupes de spectres, en avril/mai et en septembre, dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Pour la définition des secteurs, voir la figure 1.

Distribution with space of the 5 groups of particle size spectra measured in April-May and September in the estuary and gulf of Saint Lawrence. I to IV as in Figure 1.

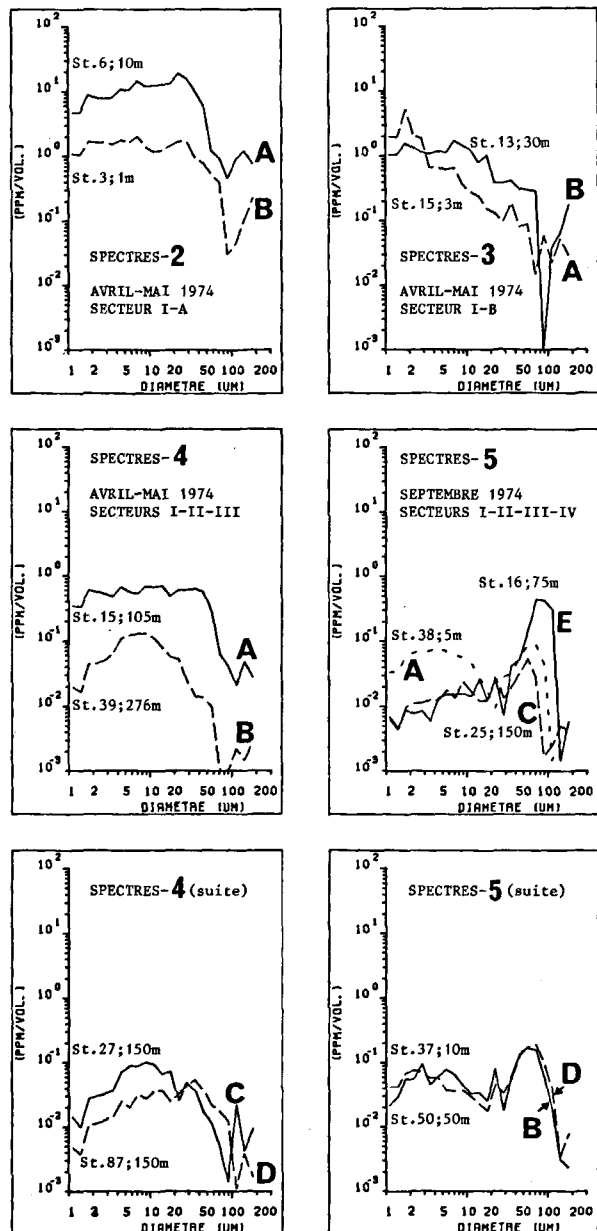


ment de mode). Nous ignorons les modalités réelles d'un tel processus. Il peut, théoriquement, s'agir d'un processus continu, discontinu, réversible ou non, à caractère aléatoire ou déterministe (Chanut, Poulet, 1982). Les phases du processus de transition, illustrées par les spectres de la figure 4, doivent être reliées, probablement, à des facteurs hydrologiques, sédimentologiques et biologiques (D'Anglejan, Smith, 1973; Cossa, Poulet, 1978; Sévigny *et al.*, 1979; Sinclair *et al.*, 1980). La description successive des groupes dans le sens 1 à 5 (fig. 4) est conforme à l'ordre d'apparition *in situ* des groupes de spectres selon l'axe longitudinal amont-aval de l'estuaire du Saint-Laurent (fig. 5). Une coupe établie entre Québec et le détroit de Cabot montre la répartition spatiale de chaque groupe dans l'ensemble de la masse d'eau (fig. 5). Cette image statique, qui ne tient compte ni des fluctuations des masses d'eau, ni de celles des spectres eux-mêmes, donne une approximation de l'extension verticale et horizontale des spectres associés aux masses d'eau dans l'estuaire et dans le golfe du Saint-Laurent à deux époques de l'année. Ainsi, l'influence terrigène que nous attribuons à l'apparition des groupes 1 et 2 est forte au printemps, réduite en automne, et elle est strictement limitée au secteur situé en amont de Pointe-des-Monts (fig. 1 et 5). L'influence maritime, que nous associons à l'apparition des groupes 4 et 5 dans l'estuaire est minimale au printemps, maximale en automne et perceptible jusqu'à l'embouchure du fjord du Saguenay (fig. 1 et 5; Cossa, Poulet, 1978; Chanut, Poulet, 1979;

Figure 6

Diversité et variation intra-groupes des formes de spectres dans les 5 groupes principaux. La station (st) et la profondeur (m) sont données pour chaque spectre. Les formes intermédiaires du groupe type sont désignées par les sous-ensembles a, b, c, d, ou e. Pour la définition et la localisation des stations, voir la figure 1. Dans chaque spectre, les 23 classes mesurées correspondent aux diamètres (µm) suivants : 1,26-1,58-2-2,51-3,17-4-5,03-6,33-8-10,05-12,67-16-20,12-25,35-32-40,24-50,70-64-80,48-101,40-128-160,95-180.

Variations of the shape of the particle size spectrum in each group 2 to 5. Particle concentration versus particle diameter plotted on a log-log scale. Station number (st) and depth (m) are given for each spectrum. Transitions between spectra of similar shape are given by spectrum A, B, C, D or E. Particle size categories measured: as in Figure 4.



Therriault *et al.*, 1980). Les groupes définis dans les figures 4 et 5 intègrent les formes décrites dans le passé par Cossa et Poulet (1978), Kranck (1979) et Chanut et Poulet (1979; 1982).

La transition entre les groupes 1-2, 2-3, 3-4 peut être interprétée par une sédimentation des plus grosses particules ou des plus denses (D'Anglejan, Smith, 1973; Kranck, 1979; Gobeil *et al.*, 1981), par une floculation des plus fines suivie d'une sédimentation (Kranck, 1979), ou par la remise en suspension des particules sédimentées (D'Anglejan, Smith, 1973; Cossa, Poulet, 1978; Gobeil *et al.*, 1981). Ces processus ont lieu de préférence dans les secteurs estuarien et côtier (Secteurs I, fig. 5) les moins profonds (< 30 m). Dans le cas des groupes 3-4, 4-5, la transition est probablement associée à l'apparition ou à la disparition d'organismes microplanctoniques (< 200 µm), responsables des floraisons phytoplanctoniques (Therriault, Lacroix, 1976; Sinclair, 1978; Sévigny *et al.*, 1979).

Variations intra-groupes

Chaque groupe de spectres a des variations internes, caractérisées par les fluctuations de la concentration des particules et de leurs modes. Cette diversité intra-groupes est illustrée dans la figure 6. Par suite de l'homogénéité du groupe 1 dont les spectres, peu nombreux, sont identiques à celui de la figure 4, ce groupe a été exclu de la discussion. Les limites inférieure et supérieure ainsi que les formes intermédiaires du spectre type sont désignées par les sous-ensembles *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, observés en des secteurs ou à des époques différents (fig. 6). On constate que l'hétérogénéité intra-groupes est croissante du groupe 1 au groupe 5. Nous ignorons encore si la transition des formes de spectres

intra-groupes est liée à un processus continu ou discontinu. Chanut et Poulet (1982) ont montré, quand la concentration est élevée, qu'il doit s'agir de masses d'eau relativement homogènes en termes de particules, et quand la concentration est faible, il s'agirait de milieux plus hétérogènes définis par des « micro-patches ». Cette hétérogénéité est particulièrement remarquable dans le groupe 5 où la variation des concentrations des fines particules (< 20 µm) est accompagnée par le glissement du mode entre 30 et 90 µm. Cette particularité est probablement due à des variations d'espèces phytoplanctoniques (Sinclair, 1978; Sévigny *et al.*, 1979). Finalement, il a été montré que les fluctuations intra-groupes et inter-groupes, illustrées dans les figures 4 et 6, sont observées à des degrés divers dans toutes les zones du Saint-Laurent à des échelles de temps variables > 30 minutes, correspondant au pas d'échantillonnage (Chanut, Poulet, 1982).

Des tests de Kolmogorov-Smirnov portant sur les échantillons des figures 3 et 6 (tab. 2) ont été effectués pour vérifier le bien fondé de nos subdivisions. Ces tests effectués sur les formes limites de chaque groupe sont parfois significatifs à 5%, rarement à 1% (tab. 2), tandis que les tests effectués sur les formes intermédiaires sont non significatifs ($p > 5\%$). Ces résultats appuient notre classification en sous-groupes analogues (fig. 6) ou de spectres variant par rapport à la forme caractéristique du groupe (fig. 4).

La comparaison des spectres est rendue difficile à travers la littérature, compte tenu des diverses méthodes de représentation graphique utilisées. L'utilisation d'une échelle log-log uniformisée (*cf.* fig. 4, 6) devrait permettre une classification universelle des spectres; par suite, leur comparaison serait rendue plus aisée d'un

Tableau 2

Variations intra-groupes des spectres de taille des particules en suspension. Les échantillons (correspondant à une station et à une profondeur particulières) ont été choisis de façon séquentielle. Test bilatéral de Kolmogorov-Smirnov portant sur différents couples de spectres appartenant à un même groupe. Seuils de signification pour $|D_{max}|$, avec $n=m=23$ (Conover, 1980) : $\text{Prob}(|D_{max}| > 0,391) = 0,05$; $\text{Prob}(|D_{max}| > 0,478) = 0,01$. Variations of particle size spectra among samples belonging to the same group. In each set of 2 spectra compared, using Kolmogorov-Smirnov's test, first and second samples are given by station numbers; depth is in brackets. Degree of freedom as in Table 1.

No Groupes (No Fig.)	No Stations (Prof. (m))	$ D_{max} $	$\text{Pr}(D_{nm} \geq D_{max})$
Avril-mai 1974			
1-1 (3)	1 (3) - 1 (20)	0,381	0,059
2-2 (3)	2 (3) - 1 (5)	0,381	0,059
2-2 (3 et 6)	3 (1) - 6 (10)	0,720	0,000
3-3 (3)	8 (5) - 8 (10)	0,217	0,649
»	8 (1) - 8 (5)	0,304	0,237
3-3 (3 et 6)	13 (30) -15 (3)	0,435	0,026
4-4 (3)	13 (60) -15 (105)	0,478	0,010
»	16 (45) -17 (40)	0,435	0,026
4-4 (3)	73 (366)-76 (147)	0,304	0,237
»	77 (288)-78 (150)	0,348	0,124
4-4 (6)	27 (50) -39 (275)	0,217	0,649
»	27 (50) -87 (150)	0,304	0,237
5-5 (3)	75 (8) -77 (50)	0,348	0,124
»	76 (5) -77 (5)	0,174	0,878
Septembre 1974			
2-2 (3)	57 (10) -60 (10)	0,304	0,237
»	54 (25) -54 (38)	0,261	0,414
3-3 (3)	55 (10) -57 (1)	0,174	0,878
»	57 (3) -57 (12)	0,304	0,237
»	38 (1) -50 (10)	0,261	0,414
4-4 (3)	37 (1) -37 (5)	0,130	0,990
»	37 (3) -37 (5)	0,174	0,878
5-5 (3)	37 (75) -38 (5)	0,435	0,026
»	38 (5) -51 (75)	0,174	0,878
5-5 (3 et 6)	37 (10) -38 (5)	0,174	0,878
»	37 (10) -50 (50)	0,130	0,990
»	38 (5) -50 (50)	0,174	0,878

environnement considéré à l'autre. D'une façon générale, les descriptions des spectres de particules ($< 200 \mu\text{m}$) publiées actuellement pour diverses zones maritimes ou côtières d'Europe et d'Amérique (cf. Sheldon *et al.*, 1972; Kitchen *et al.*, 1975; Eisma, 1981; Syritski, Murray, 1981; McCave, 1983; Loeillet, 1984) montrent deux tendances majeures. Premièrement, en zones côtière, estuarienne ou près du fond (couche néphéloïde), la forme des spectres est uni- ou polymodale. Deuxièmement, en zone océanique, elle est franchement homogène (cf. spectre plat), associée à des concentrations faibles. Les données sur les particules peuvent être représentées par le nombre N en fonction du diamètre d , pour chaque classe de taille, sous la forme linéaire $N = kd - P$, où p est la pente de la droite et k une constante (cf. McCave, 1984). Une valeur de $p = 3$ correspond à des spectres plats à faible concentration, alors que des valeurs de $p < 3$ correspondent à des spectres polymodaux à concentrations élevées. Dans l'ensemble de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, les spectres de particules suivent cette deuxième tendance (fig. 4, 6), signifiant ainsi que la concentration des particules n'est pas constante selon l'échelle logarithmique croissante des tailles (Sheldon *et al.*, 1982). Une distribution homogène en tailles de 1 à $10^7 \mu\text{m}$, telle que définie par Sheldon *et al.* (1972) est probablement caractéristique des milieux océaniques où règne un état d'équilibre dynamique, essentiellement de nature biologique, entre les n composantes des particules du spectre. Au contraire, une distribution hétérogène en tailles serait, à notre avis, caractéristique des milieux côtiers dominés par un état de déséquilibre dynamique, de nature hydrologique et biologique entre les particules, illustré par la succession des diverses formes des spectres, analogues à ceux mesurés dans l'intervalle 1-200 μm dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent ou dans n'importe quel autre milieu côtier.

Relation entre les facteurs hydrologiques

La figure 7 montre, pour l'ensemble des données recueillies dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, la relation entre les groupes de spectres et les valeurs de la salinité et de la température. Il existe une coïncidence entre les spectres et les propriétés thermo-halines des masses d'eau. A l'exception du groupe 1 qui disparaît de la zone étudiée en septembre, nous observons les mêmes tendances générales aux deux saisons. Les groupes 1 et 2 appartiennent systématiquement aux masses d'eau les plus « chaudes » et saumâtres, d'origine fluviale ou influencées par un apport en eau douce. L'amplitude des écarts thermo-halins, faible au printemps, augmente en automne, particulièrement dans le cas du groupe 2. Les spectres du groupe 3 appartiennent à des eaux caractérisées par des températures $< 4^\circ\text{C}$ au printemps et $< 12^\circ\text{C}$ en automne. L'écart thermique associé à ce groupe est faible ($< 6^\circ\text{C}$). Le groupe 3 occupe des eaux dont l'intervalle des variations de salinité est très important ($\sim 5-30$), largement supérieur aux écarts halins observés pour tous les autres groupes (fig. 7). Les groupes 4 et 5 coïncident avec des masses d'eau salée (20-35), dont la température, très variable, présente l'amplitude de variation maximale. Ces deux groupes ont l'originalité,

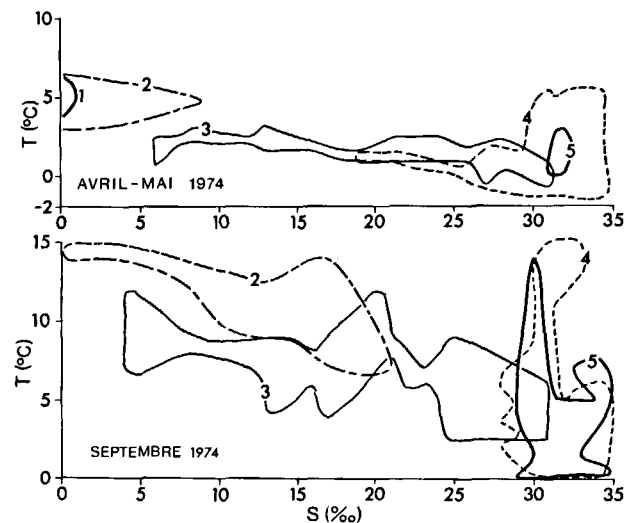


Figure 7

Relation entre le groupe de spectres et les caractéristiques thermo-halines des masses d'eau de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Chaque enveloppe identifiée par le numéro du groupe de spectres 1 à 5, contient tous les spectres d'un groupe donné, observés dans les masses d'eau, définies par la salinité (S) et la température (T). Ces diagrammes sont basés sur les 1202 échantillons récoltés successivement en avril/mai et en septembre 1974.

Relationships between particle size spectra and physical parameters (S; T°C) measured in the estuary and gulf of Saint Lawrence in April-May and September 1974. Each envelope, 1 to 5, corresponds to a group of particle size spectra.

par rapport aux groupes 1, 2 et 3, de couvrir des écarts thermiques importants et des écarts halins réduits (fig. 7).

La figure 7 révèle l'absence ou la présence de « cloisonnements hydrologiques » entre les groupes de spectres, définis par la discontinuité plus ou moins marquée des valeurs de salinité et de température. Ainsi, les groupes 1-3, 1-4, 1-5, 2-4 et 2-5, respectivement (fig. 7), sont placés dans des eaux sans aucune caractéristique thermo-haline commune. On conçoit, par conséquent, que ces groupes ne coexistent pas et soient spatialement séparés. Par contre, les groupes 1-2, 2-3, 3-4, 3-5 et 4-5, séparés spatialement (fig. 5), peuvent se rencontrer dans des masses d'eau ayant des caractéristiques thermo-halines identiques (fig. 7). Ainsi, nos observations tendent à montrer qu'un continuum est possible uniquement entre les spectres des groupes 1-2-3 et des groupes 3-4-5. Un tel continuum est probablement impossible entre les spectres des groupes 1-4, 1-5, 2-4 et 2-5 respectivement, qui sont hydrologiquement séparés. Ces déductions sont étayées par les observations de la figure 5 illustrant le cloisonnement spatial entre les divers groupes suivant l'axe de l'estuaire. Elles ont été vérifiées par l'étude ponctuelle de la séquence des variations intra et inter-groupes (Chanut, Poulet, 1982). Le fait que des groupes distincts de particules soient systématiquement associés à des masses d'eau différentes (fig. 7), correspondant à des régimes estuariens ou marins particuliers, montre qu'il ne peut pas exister de continuum au cours du transfert de ces particules dans l'immense complexe hydrologique du Saint-Laurent. Des discontinuités, dues à des événements physico-chimiques (sédimentation/resuspension/adsorption/désorption/floculation/défloculation; Postma 1967; Schubel, 1971; Silverberg,

Sundby, 1979; Kranck, 1979) et biologiques (croissance/mortalité/agrégation des micro-organismes du plancton) (Parsons 1969; Sheldon *et al.*, 1972; Riaux, Douvillé, 1980) interviennent probablement dans l'évolution des spectres ne présentant entre eux aucun potentiel d'interfaçage (cf. Groupes 1-4, 1-5, 2-4, 2-5). Nous devons donc rechercher une, ou des formes transitoires. Le groupe 3, observé dans les masses d'eau aux amplitudes halines maximales (fig. 7) est hydrologiquement apte à servir d'interface entre les structures estuariennes (groupes 1-2) et marines (groupes 4-5; fig. 4 et 7). En suivant ce raisonnement, les fines particules du groupe 3, qui interviennent dans la composition des spectres 2, 4 et 5 (fig. 4), présentent un réel aspect cosmopolite. Elles constituent probablement un continuum, en termes de particules, dans l'ensemble du Saint-Laurent. Il reste à vérifier si cette argumentation, fondée uniquement sur le critère des tailles, est confirmée par l'analyse de leur composition chimique.

Bewers et Yeats (1980) ont estimé à 93% la perte par sédimentation des particules à l'intérieur de l'ensemble du système estuaire-golfe, tandis que 7% seulement du matériel en suspension serait exporté vers l'Océan Atlantique par le détroit de Cabot. Le Saint-Laurent se comporterait ainsi comme un système semiferme dans lequel les particules constituant les spectres 1 à 5 (fig. 4, 6) sont mises en suspension ou sédimentent dans des secteurs géographiques différents (fig. 1, 5). Selon les estimations de Bewers et Yeats (1980), les particules d'origine fluviale sédimentent avec un taux de 336 kg. sec^{-1} dans l'estuaire supérieur, mais 0,4% seulement du stock parvient à sédimer dans l'estuaire moyen (fig. 1). Ces particules correspondent probablement aux spectres de type 1 et 2 (fig. 4, 5, 7). Les estimations des taux de sédimentation sont de 154 kg. sec^{-1} dans l'estuaire maritime et de 259 kg. sec^{-1} dans le Golfe (Bewers, Yeats, 1980). Il ne s'agit probablement pas des mêmes particules, comme le suggèrent les types de spectres (groupes 3, 4, 5) mesurés dans ces deux secteurs (fig. 4, 5, 7). En outre, la composition chimique des particules de l'estuaire maritime constitue un indice supplémentaire. Les valeurs du rapport C/N mesurées chez des particules récoltées à l'aide de trapes à sédi-

ment varient de 7 à 15 dans l'estuaire maritime (Silverberg *et al.*, 1985). Ces valeurs sont analogues à celles obtenues par une analyse chimique plus complète des particules en suspension appartenant aux groupes 4 et 5 (Poulet *et al.*, 1986), dont la taille est $> 15 \mu\text{m}$ et d'origine biogénique. Cependant, des valeurs comprises entre 15 et 30 sont aussi reportées par ces auteurs pour les particules $< 15 \mu\text{m}$, d'origine terrigène ou provenant de débris marins. Silverberg *et al.* (1985) constatent que le taux de sédimentation des particules dans l'estuaire maritime est fonction de la saison ($1 \text{ à } 5 \text{ mm. an}^{-1}$), avec un maximum prononcé au printemps, que nous relierions aux floraisons phytoplanctoniques. À la lumière de ces données granulométriques et chimiques, il y aurait donc une similitude chimique entre les particules en suspension et celles qui ont sédimenté. Les particules sédimentées, récoltées par Silverberg *et al.* (1985) dans l'estuaire maritime proviennent probablement des plus grosses particules en suspension ($> 15 \mu\text{m}$) des groupes 4 et 5 (fig. 4, 6 et 7) dont le C/N < 15 (Poulet *et al.*, 1986). Nous estimons que les particules fines ($< 15 \mu\text{m}$) des groupes 3, 4 et 5, dont le C/N > 15 et qui correspondent à des débris biogéniques (Poulet *et al.*, 1986) ont probablement un taux de sédimentation nettement plus faible, ce qui leur conférerait le caractère cosmopolite évoqué plus haut, et une sédimentation retardée, étalée dans tout le système et permettant ainsi une exportation partielle vers l'océan, correspondant en partie, aux 7% de la perte évaluée par Bewers et Yeats (1980).

Remerciements

Nous adressons nos sincères remerciements aux Drs J. M. Bewers et B. Sundby qui ont invité l'un d'entre nous (S. A. Poulet) à participer à leurs campagnes de 1974 à bord des navires océanographiques CSS Hudson et CSS Dawson, dont nous remercions l'équipage. Ce travail a été partiellement financé par le CNRC (A-9667) et la DGES-FCAC. La dactylographie a été assurée par M^{mes} M. Juge et N. Guyard.

RÉFÉRENCES

- Bewers J.M., Yeats P.A., 1980. Transport of metals through the coastal zone. CM. 1980/Gen 4 (Symp.), Marine Environmental quality committee, International Council for the Exploration of the Sea.
- Cauwet G., 1978. Organic chemistry of sea water particulates. Concepts and development, *Oceanol. Acta*, 1, 1, 99-105.
- Chanut J.P., Poulet S.A., 1979. Distribution des spectres de tailles des particules en suspension dans le fjord du Saguenay, *Can. J. Earth Sci.*, 16, 240-249.
- Chanut J.P., Poulet S.A., 1982. Short-term variability of the size spectra of suspended particles in a rapidly changing environment, *Estuarine Coast. Shelf Sci.*, 15, 497-513.
- Chanut J.-P., Poulet S.A., Cossa D., Marty J.-C., 1977. Factor analysis of suspended particulate matter in the estuary and gulf of St. Lawrence, Paper delivered at the First World Conference on Mathematics at the Service of Man, 11-16 July 1977, Technical Session 2/5, Barcelona, Spain.
- Conover W.J., 1980. *Practical non parametric statistics*, 2ed., J. Wiley & Sons, New York, 493 p.
- Cossa D., Poulet S.A., 1978. Survey of trace metal contents of suspended matter in the St. Lawrence estuary and Saguenay Fjord, *J. Fish. Res. Board Can.*, 35, 338-345.
- D'Anglejan B.F., Smith E.C., 1973. Distribution, transport and composition of suspended matter in the St. Lawrence estuary, *Can. J. Earth Sci.*, 10, 1380-1396.
- D'Anglejan B.F., Ingram R.G., 1976. Time-depth variations in tidal flux of suspended matter in the St. Lawrence Estuary, *Estuarine Coast. Mar. Res.*, 4, 401-416.
- Eisma D., 1981. Suspended matter as a carrier of pollutants in estuaries and the sea, in: *Marine environmental pollution. Vol. 2: Dumping and mining*, edited by R.A. Geyer, Elsevier, Amsterdam, 281-295.
- El-Sabh M.I., 1976. Surface circulation pattern in the Gulf of St. Lawrence, *J. Fish. Res. Board Can.*, 33, 124-138.
- El-Sabh M.I., 1979. The lower St. Lawrence Estuary as a physical oceanographic system, *Natur. Can.*, 106, 55-73.
- Forrester W.D., 1964. A quantitative temperature-salinity study of the Gulf of St. Lawrence, *Beford Inst. Oceanogr. Rapp. Ser.*, B10-64-11.
- Gobeil C., Sundby B., Silverberg N., 1981. Factors influencing particulate matter geochemistry in the St. Lawrence estuary turbidity maximum, *Mar. Chem.*, 10, 123-140.
- Hull C.H., Nie N.H., 1981. *SPSS update 7-9. New procedures and facilities for releases 7-9*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, 402 p.
- Kitchen J.C., Menzies D., Park J., Zanevels R.V., 1975. Particle size distribution in a region of coastal upwelling analyzed by characteristic vectors, *Limnol. Oceanogr.*, 20, 775-783.
- Kranck K., 1979. Dynamics and distribution of suspended particulate matter in the St. Lawrence estuary, *Natur. Can.*, 106, 163-173.
- Loeillet C., 1984. Étude statistique des distributions de taille des particules en suspension dans deux zones soumises à l'influence rhodannienne (Darse-de Fos, Golfe du Lion), *Thèse 3^e cycle*, Univ. Marseille.
- Loring D.H., 1979. Geochemistry of cobalt, nickel, chromium, and vanadium in the sediments of the estuary and open gulf of St. Lawrence, *Can. J. Earth Sci.*, 16, 6, 1196-1209.
- Loring D.H., Nota D.J.G., 1973. Morphology and sediments of the Gulf of St. Lawrence, *Fish. Res. Board Can.*, 182.
- Martin J.M., Meybeck M., 1979. Elemental mass balance of material carried by major world rivers, *Mar. Chem.*, 7, 173-206.
- Mc Cave I.N., 1983. Particulate size spectra, behaviour and origin of nepheloid layers over the Nova Scotia continental rise, *J. Geophys. Res.*, 88, 7647-7666.
- Mc Cave I.N., 1984. Size spectra and aggregation of suspended particles in the deep ocean, *Deep-Sea Res.*, 31, 329-352.
- Nie N.H., Hull C.H., Jenkins J.G., Steinbrenner R., Bent D.H., 1975. *Statistical Package for the Social Sciences (S.P.S.S.)*, 2nd ed., Mc Graw-Hill, New York, 675 p.
- Parsons T.R., 1969. The use of particle size spectra in determining the structure of a plankton community, *J. Oceanogr. Soc. Jpn*, 25, 6-15.
- Postma H., 1967. Sediment transport and sedimentation in the estuarine environment, in: *Estuaries*, edited by G. Lauff, AAAS Publ. n° 83, 158-179.
- Poulet S.A., Cossa D., Marty J.-C., 1986. Combined analyses of the size spectra and biochemical composition of particles in the St. Lawrence Estuary, *Mar. Ecol. Progr. ser.* (in press).
- Riaux C., Douvillé J.-L., 1980. Short-term variations in phytoplankton biomass in a tidal estuary in Northern Brittany, *Estuarine Coast. Mar. Sci.*, 10, 85-92.
- Schubel J.R., 1971. Tidal variation of the size distribution of suspended sediment at a station in the Chesapeake Bay turbidity maximum, *Neth. J. Sea Res.*, 5, 252-266.
- Sévigny J.M., Sinclair M., El-Sabh M.I., Poulet S.A., Coote A., 1979. Summer plankton distributions associated with the physical and nutrient properties of the north-western Gulf of St. Lawrence, *J. Fish. Res. Board Can.*, 36, 187-203.
- Sheldon R.W., 1969. A universal grade scale for particulate materials, *Proc. of the Geological Society of London*, 1659, 293-295.
- Sheldon R.W., Parsons T.R., 1967. A continuous size spectrum for particulate matter in the sea, *J. Fish. Res. Board Can.*, 24, 909-915.
- Sheldon R.W., Prakash A., Sutcliffe W.H., 1972. The size distribution of particles in the ocean, *Limnol. Oceanogr.*, 17, 327-340.
- Silverberg N., Sundby B., 1979. Observations in the turbidity maximum of the St. Lawrence estuary, *Can. J. Earth Sci.*, 16, 939-950.
- Silverberg N., Edenborn H.M., Belzile N., 1985. Sediment response to seasonal variations in organic matter input, in: *Marine estuarine geochemistry*, edited by Sigleo and Hattovi, American Chemical Society, Lewis publisher Inc. (in press).
- Sinclair M., 1978. Summer phytoplankton variability in the lower St. Lawrence estuary, *J. Fish. Res. Board Can.*, 35, 1171-1185.
- Sinclair M., Chanut J.-P., El-Sabh M.I., 1980. Phytoplankton distribution observed during a 3 1/2 days fixed-station in the lower St. Lawrence estuary, *Hydrobiologia*, 75, 129-147.
- Sundby B., 1974. Distribution and transport of suspended particulate matter in the Gulf of St. Lawrence, *Can. J. Earth Sci.*, 11, 1517-1533.
- Syvitski J.P.M., Murray J.W., 1981. Particle interaction in fjord suspended sediment, *Mar. Geol.*, 39, 215-243.
- Therriault J.-C., Lacroix G., 1976. Nutrients, chlorophyll, and intertidal tides in the St. Lawrence Estuary, *J. Fish. Res. Board Can.*, 33, 2747-2757.
- Therriault J.-C., de Ladurantaye R., Ingram R.G., 1980. *Particulate matter exchange processes between the St. Lawrence Estuary and the Saguenay Fjord*, edited by H.L. Freeland, D.M. Farmer and C.D. Levings, Fjord Oceanography, NATO Conference Series IV, Marine Sciences, Plenum Press, NY, 363-366.
- Trites R.W., 1972. The Gulf of St. Lawrence from a pollution viewpoint, in: *Marine pollution and sea life*, FAO 1972, 59-72.
- Troude J.P., 1975. Stabilité des suspensions colloïdales dans l'estuaire moyen du St. Laurent, *Mém. Maîtrise, Univ. Laval, Québec*, 164 p.
- Wangersky P.J., 1965. The organic chemistry of sea water, *Am. Sci.*, 53, 358-374.