

## B.- COMPORTEMENT DE LA SILICE DISSOUE DANS L'ESTUAIRE DE L'ESCAUT

par

O. BECKERS et R. WOLLAST

### 1.- Introduction

L'étude du comportement de la silice dissoute dans l'estuaire présente de l'intérêt à plusieurs titres. Il s'agit en effet d'un nutriment indispensable au développement des diatomées qui assurent dans nos régions la part la plus importante de la productivité primaire en mer. Cette importance est bien mise en évidence par les calculs de Lisitzin (1972) qui montre que pour chaque gramme de carbone consommé dans l'océan, les organismes fixent en moyenne un poids approximativement équivalent de silice. Les estuaires constituent aussi une des principales sources d'apport de silice dans le milieu marin, en particulier dans les régions côtières puisque les eaux douces contiennent en général 15 mg SiO<sub>2</sub>/l alors que la teneur moyenne des eaux de l'océan n'est que de 6 mg SiO<sub>2</sub>/l et que les eaux de surface présentent des concentrations souvent inférieures à 0,1 mg SiO<sub>2</sub>/l .

Le comportement de la silice dissoute dans les eaux des estuaires a récemment retenu l'attention de plusieurs chercheurs. Il existe une vive controverse à l'heure actuelle sur la consommation éventuelle de la silice dissoute dans cette zone et sur la nature des processus responsables de cette consommation.

Généralement les consommations de silice observées dans les estuaires se situent entre 10 et 20 % [Burton et Liss (1973)] et l'amplitude du phénomène ne dépasse guère les erreurs d'estimation que l'on peut faire sur le budget de la silice. Toutefois, Wollast et De Broeu (1971) et Van Bennekom (1974) ont démontré l'existence d'une consommation importante de silice dissoute respectivement dans les estuaires de l'Escaut et du Rhin.

Les auteurs attribuent cette consommation à l'activité des diatomées et il est intéressant de noter qu'une telle situation n'a jamais été décrite que pour des estuaires dont la charge en phosphore et en azote est particulièrement élevée par suite des diverses activités humaines.

Il existe d'autres hypothèses quant à l'élimination de la silice dissoute lors du mélange des eaux douces et de l'eau de mer. MacKenzie et Garrels (1966) et MacKenzie *et al.* (1967) ont montré que les argiles mises en suspension dans l'eau de mer pouvaient libérer ou consommer de la silice dissoute suivant la teneur de cet élément à l'état dissous dans l'eau et la nature minéralogique de l'argile. Pour Bien *et al.* (1958), la silice dissoute dans le Mississippi réagit chimiquement avec les solides en suspension lorsque la salinité devient suffisante.

De manière similaire, Liss et Spencer (1970) estiment que 10 à 20 % de la silice dissoute de la rivière Conoway est éliminée par un processus d'adsorption inorganique par la matière en suspension dans la zone estuarienne.

Stefanson et Richards (1963), Banoub et Burton (1968), Burton *et al.* (1970), Wollast et De Broeu (1971) et Fanning et Pilson (1973) pensent par contre que la consommation de silice par des réactions chimiques inorganiques est probablement négligeable dans la zone estuarienne.

Nous avons accordé une importance particulière à ce problème en lui consacrant un chapitre particulier étant donné les répercussions que la consommation en silice dans les estuaires desservant la mer du Nord pouvaient avoir sur l'équilibre des substances nutritives en milieu marin.

## 2.- Caractérisation du processus de consommation de silice dans l'Escaut

La relation entre la salinité et la concentration d'une espèce quelconque permet de détecter aisément si celle-ci se comporte de manière conservative au cours du mélange des eaux douces et de l'eau de mer dans la zone estuarienne.

En effet, dans ce cas, la relation entre la concentration de cette espèce et la salinité est nécessairement linéaire. L'existence d'une

courbure convexe dénote l'existence d'un apport ou d'une production de la substance considérée et inversement les processus de consommation se traduisent par une courbure concave.

Nous discuterons ci-dessous essentiellement les résultats obtenus au cours de l'année 1973 qui s'est caractérisée par une régularité remarquable des débits, à l'exception d'une petite crue au cours du mois de février.

La figure 1 montre à titre d'exemple l'évolution de la silice dissoute au cours des campagnes de mesure de 1973. Si l'on compare les courbes obtenues aux droites de dilution, on constate que la silice est pratiquement conservative en hiver, et qu'elle subit une consommation qui s'accroît au cours de l'été pour se résorber de nouveau au cours de l'automne. L'influence saisonnière suggère que ce processus est lié à l'activité biologique et en particulier au développement des diatomées, dont les débris de squelettes sont abondants dans les sédiments de l'estuaire.

Pour déterminer de manière plus précise la zone de consommation ou de production de la silice dissoute et son importance quantitative, il est nécessaire de procéder à une analyse des profils de concentration qui tient compte des phénomènes hydrodynamiques d'advection et de diffusion turbulente se produisant dans l'estuaire.

L'analyse que nous avons effectuée est basée sur un modèle unidimensionnel stationnaire. Les équations décrivant les profils de salinité et de silice peuvent être respectivement décrites par

$$\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon \frac{\partial s}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (us) = 0$$

et

$$\frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (uc) + p - r = 0$$

où  $p$  et  $r$  sont des termes complexes de production et de consommation de silice.

Ces équations ont été appliquées aux divers profils longitudinaux de salinité et de silice relevés mensuellement dans l'Escaut. Les débits et les sections mouillées étant connus, ( $u_x = \frac{V_x}{\Omega_x}$ ), on estime tout d'abord par calcul numérique les coefficients  $\varepsilon$  en fonction de  $x$  à l'aide du profil de salinité. On peut alors calculer la contribution des

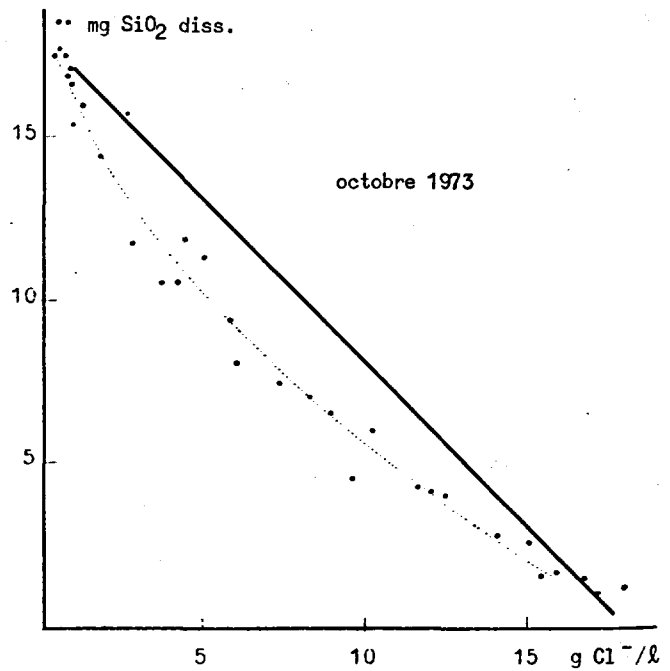
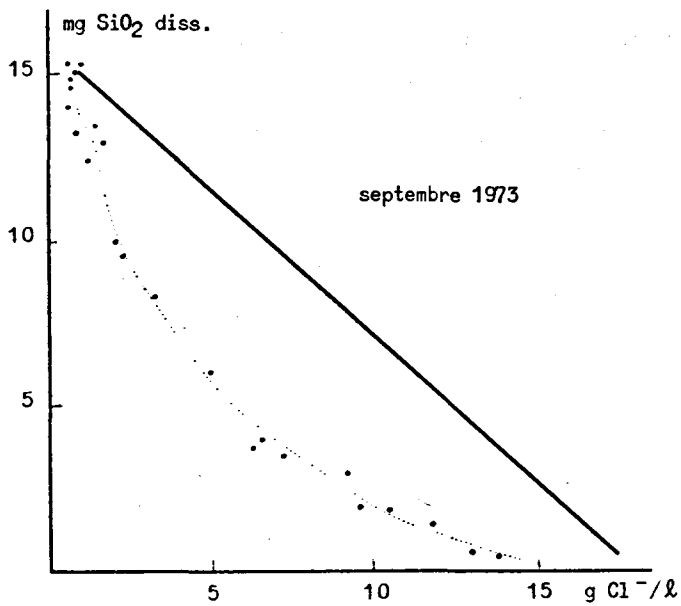
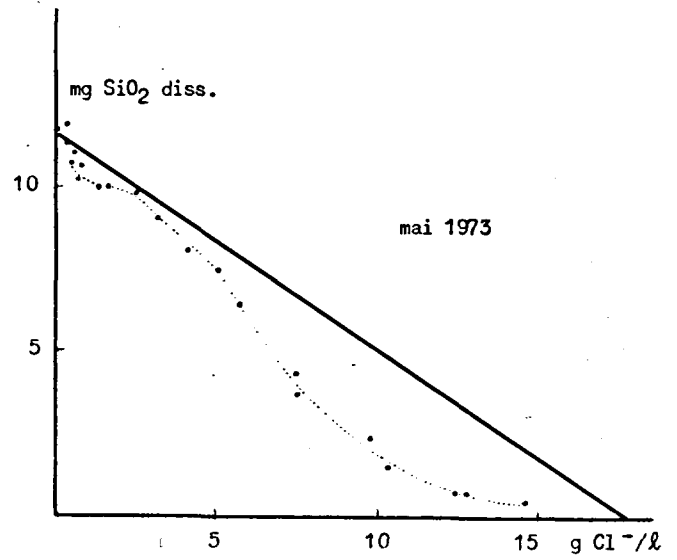
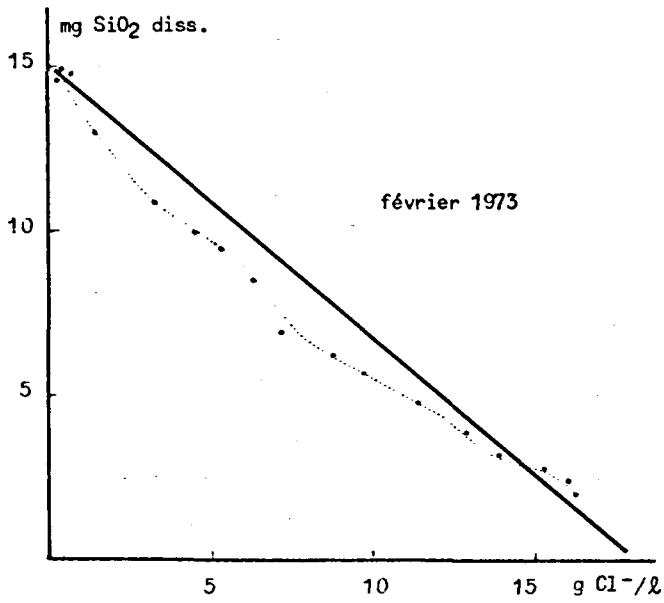


fig. 1.

Evolution de la silice dissoute en fonction de la salinité et comparée à la droite de dilution (février, mai, septembre et octobre).

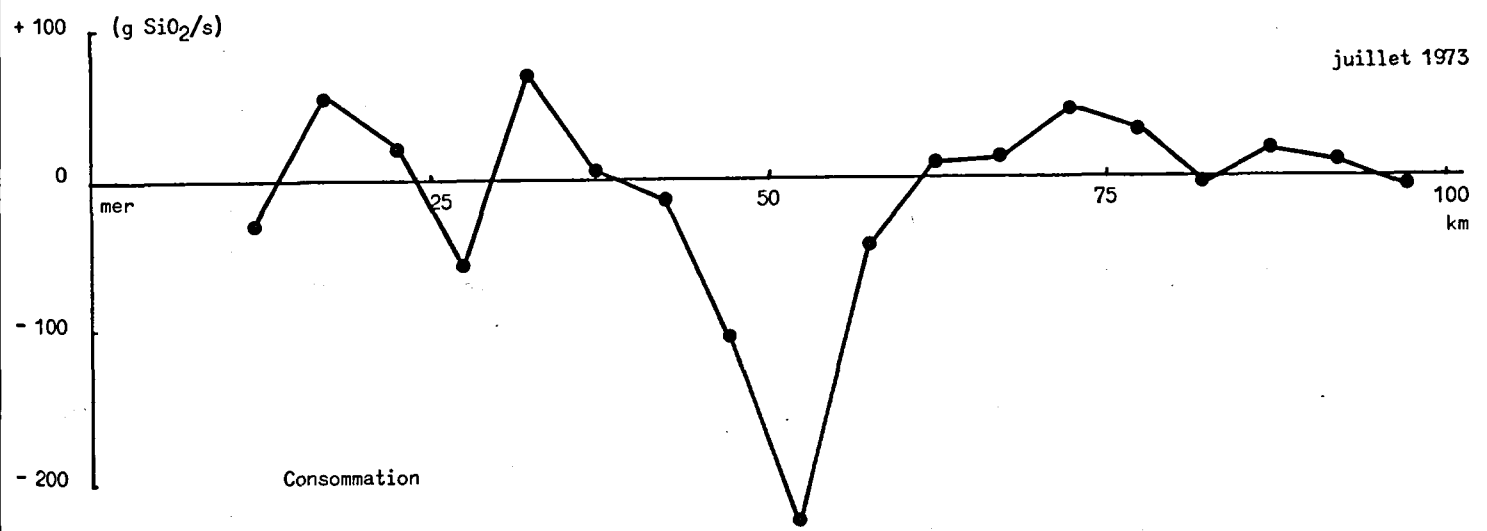
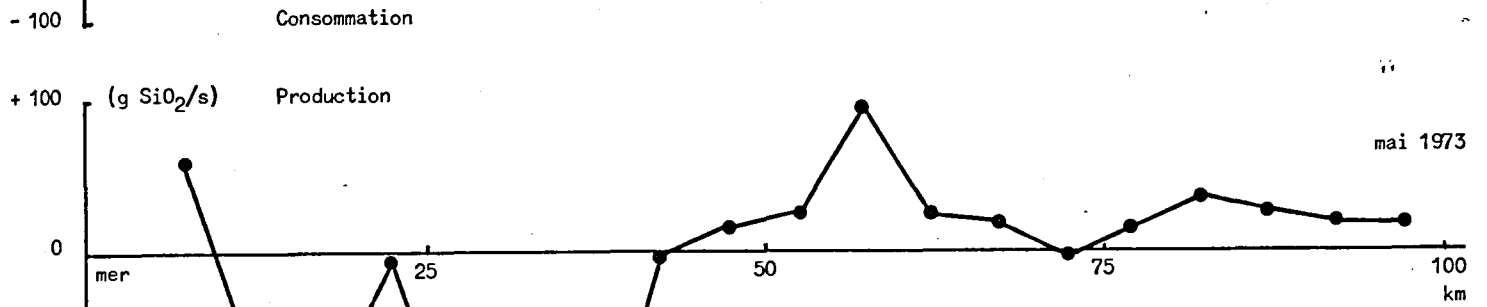
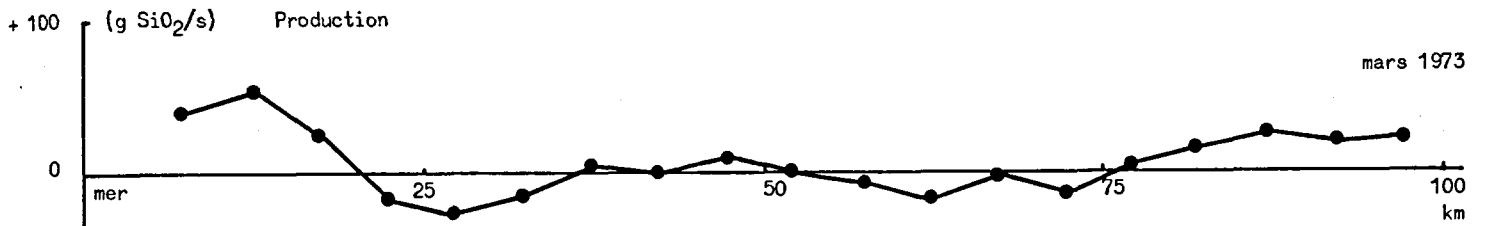


fig. 2.

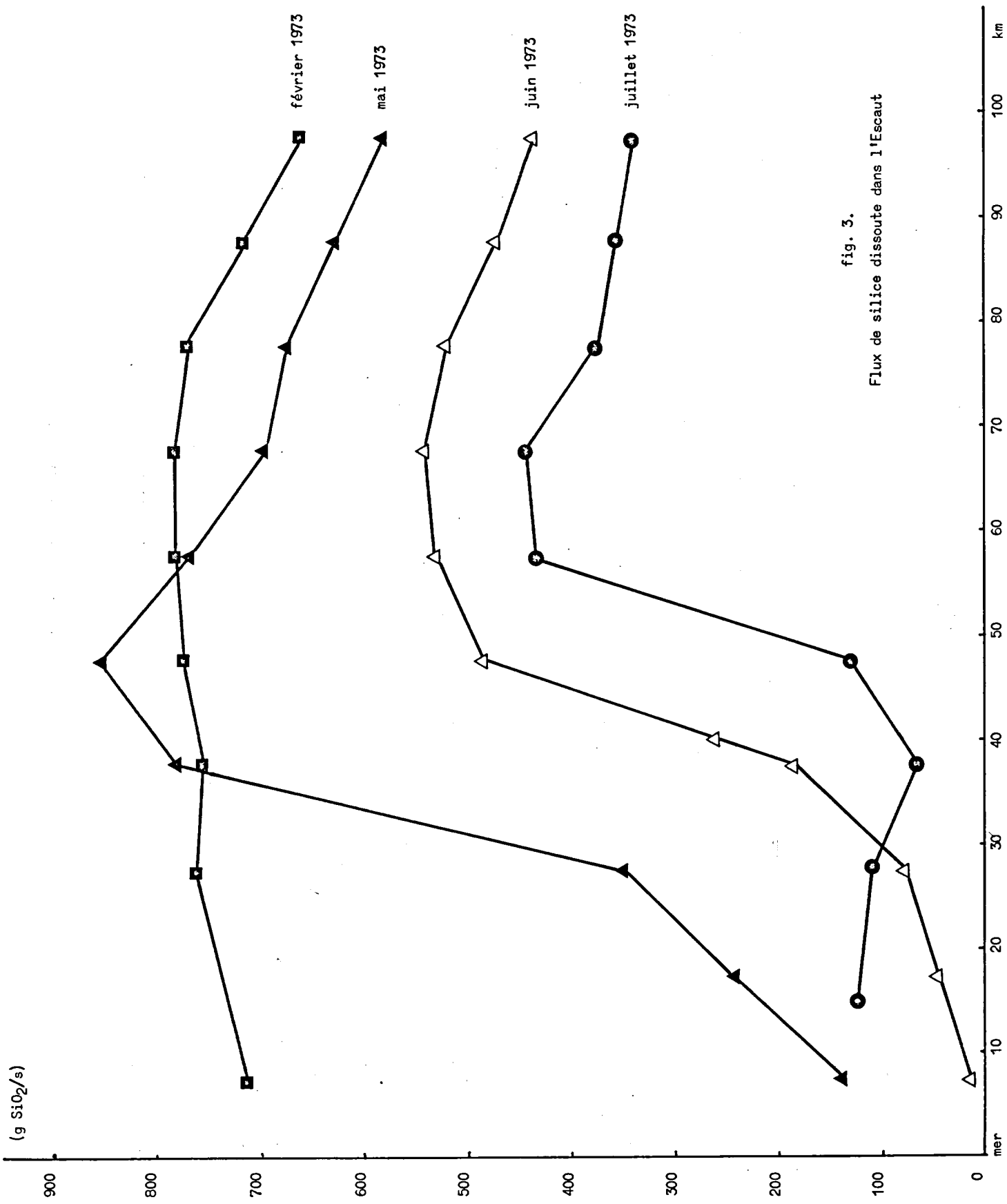


fig. 3.  
Flux de silice dissoute dans l'Escaut

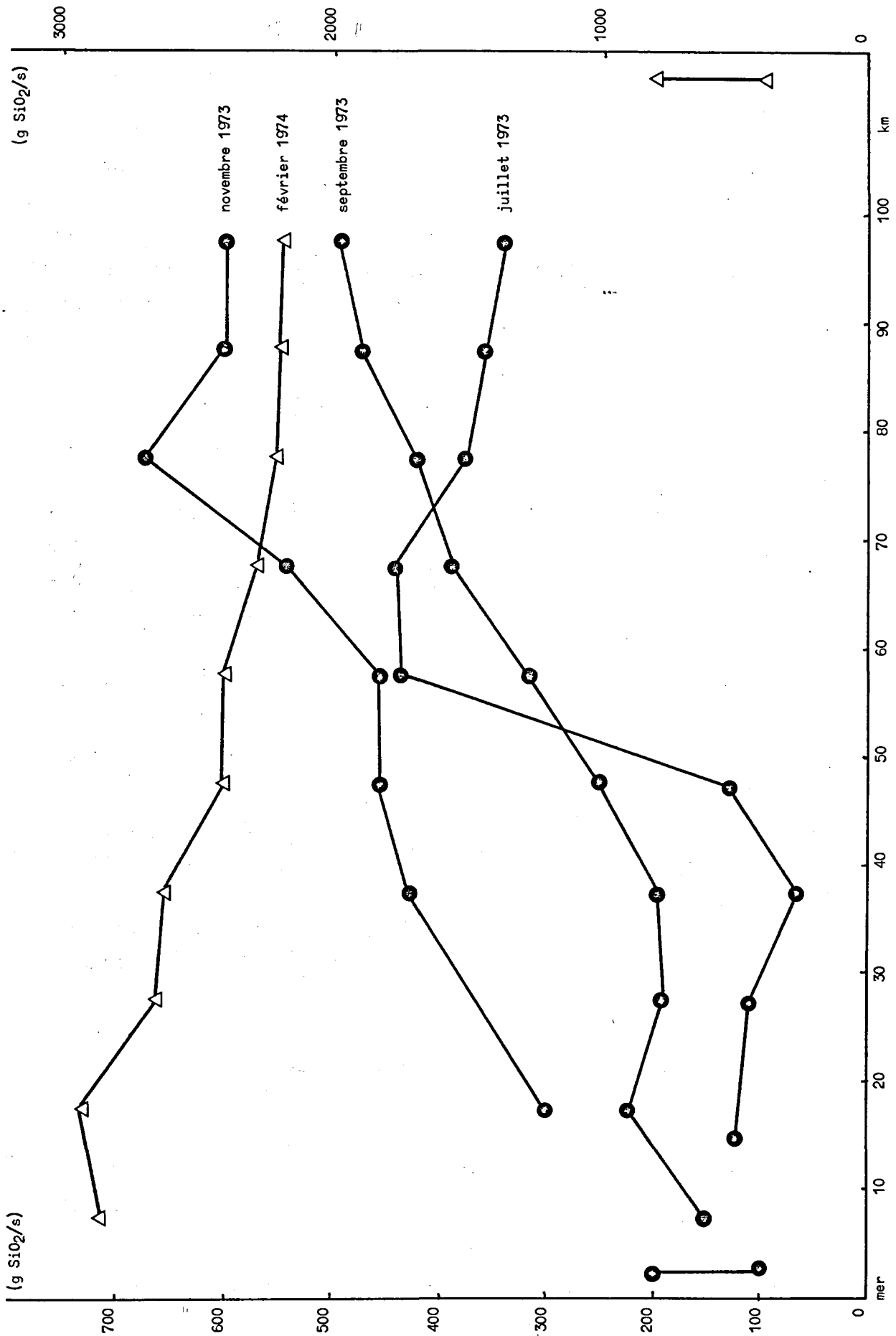


fig. 4.  
Flux de silice dissoute dans l'Eiscout

termes de dispersion et d'advection pour la silice et en déduire par différence le terme de production ou la consommation nette ( $p - r$ ) tout au long de l'estuaire.

Les résultats de ces calculs intégrés sur des sections de 5 km de long sont représentés dans la figure 2. Nous avons comparé à titre d'exemple la situation au mois de mai et de juillet correspondant à une période de consommation importante à celle de mars où la silice se comporte de manière plus conservative.

On observe que la consommation de silice est en fait très localisée et présente un maximum au km 35 lors du mois de mai et un maximum au km 55 lors du mois de juillet.

La connaissance de  $u(x)$  et  $\epsilon(x)$  permet aussi de calculer le débit de silice en tout point de l'estuaire pour un profil de concentration donné. En l'absence de processus de consommation ou de production, ce débit doit croître légèrement de manière linéaire par suite des apports latéraux d'eaux douces riches en silice tout au long de l'estuaire.

La figure 3 représente les flux calculés au cours des mois présentant une forte consommation de silice qui se marque par une chute brutale des flux. Il est intéressant de noter que celle-ci se déplace progressivement vers l'amont du mois de mai au mois de juillet 1973. Dans la figure 4, nous avons représenté les débits de silice des mois de juillet 1973 à février 1974, couvrant une période où la consommation de silice diminue fortement.

Le calcul des flux montre en effet le phénomène inverse à celui de la figure 3, la chute se déplace progressivement vers l'aval traduisant le renouvellement des eaux de l'estuaire par des eaux douces riches en silice dissoute et dont la consommation s'estompe au cours du temps, pour disparaître pratiquement au cours des mois d'hiver.

### 3.- Apport de silice dissoute par les sédiments

Les estimations de consommation nette de silice nécessitent une bonne connaissance des divers apports possibles. Le relargage de silice dissoute à partir des eaux interstitielles des sédiments peut constituer une source de silice dissoute appréciable.



Le flux de silice dissoute vers les eaux de surface peut être estimé d'après l'équation de diffusion :

$$J_{z=0} = \epsilon \frac{d}{dz} [\text{SiO}_2]_{z=0}$$

si l'on connaît le gradient de concentration  $\frac{d}{dz} [\text{SiO}_2]$  au voisinage de l'interface eau-sédiment.

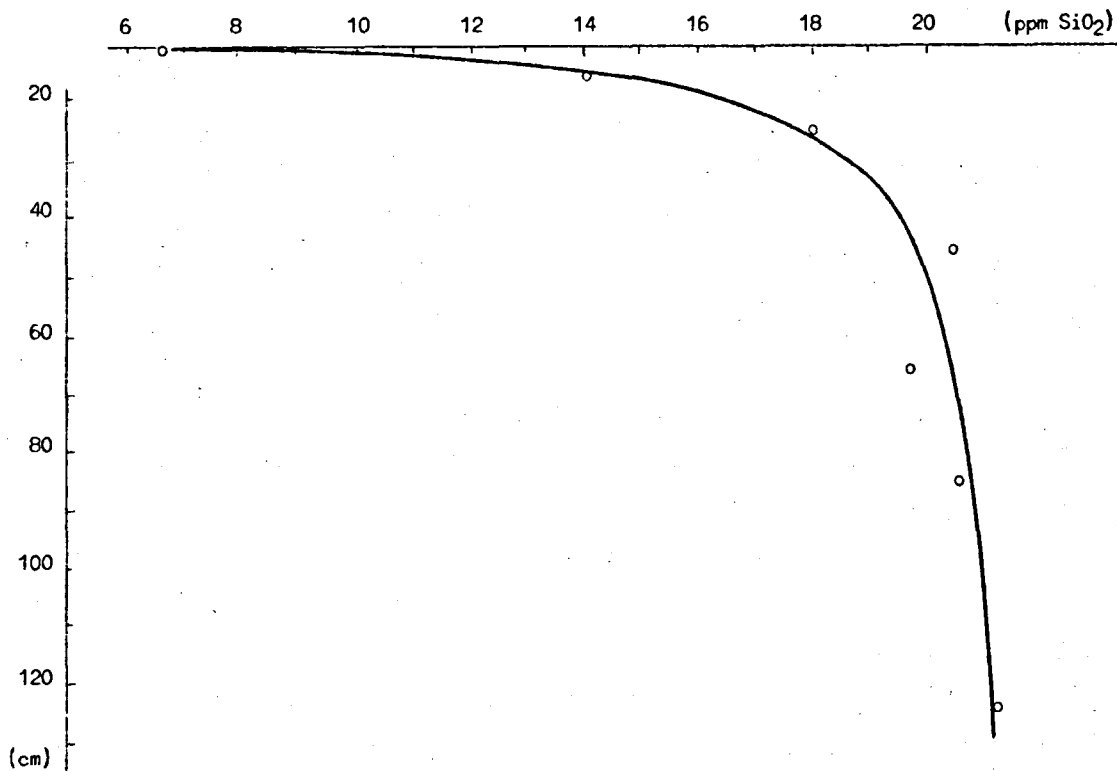


fig. 5.

Profil vertical de concentration en silice dissoute dans les eaux interstitielles d'une carotte de sondage prélevée à Zandvliet.

La figure 5 donne un exemple du profil de concentration en silice dissoute relevé dans les eaux interstitielles d'une carotte de forage prélevée à Zandvliet.

Pour un coefficient de diffusion de la silice égal à  $2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$  [Wollast et Garrels (1971)], on obtient dans ce cas un flux égal à

$3 \times 10^{-12} \text{ g/cm}^2\text{s}$ , ce qui représente un apport de 0,15 g/s pour une section de 5 km de long. Dans la même section, l'apport latéral de silice par les eaux douces riches en silice dissoute (15 ppm) représente 7,5 g/s. L'apport des sédiments peut donc être considéré comme négligeable dans le cas de l'Escaut.

Les processus de production de silice sont dans tous les cas relativement faibles et ne sont pas de nature à modifier sensiblement les flux de silice dissoute dans l'estuaire. Nous nous attacherons donc principalement à la discussion des processus de consommation.

#### 4.- Nature des processus de consommation de la silice

Ainsi que nous l'avons indiqué dans l'introduction, la consommation de silice dans la zone estuarienne peut-être attribuée à une activité biologique ou à des réactions chimiques faisant intervenir les matières en suspension. La nature saisonnière de la consommation de silice observée dans l'Escaut constitue un argument en faveur de l'activité du phytoplancton.

Une étude systématique de la distribution des espèces planctoniques réalisée par De Pauw (1975) montre (figure 6) que les diatomées, principaux consommateurs de silice, se développent de manière fort active durant la période d'été et que l'on peut assister à plusieurs *blooms* dont la période varie d'ailleurs suivant la position. Généralement le nombre de diatomées observées est plus grand à Flessingue qu'à Bath et leur croissance débute préférentiellement en aval de l'estuaire. Cette constatation doit être rapprochée de l'évolution de la consommation de silice dissoute, décrite dans le paragraphe précédent, et dans lequel on a montré que cette consommation débutait à l'embouchure et se propageait progressivement vers l'amont au cours de l'été. Les résultats de De Pauw ont été simulés à l'aide d'un modèle unidimensionnel stationnaire décrivant le profil de concentration longitudinal de silice dissoute dans l'Escaut. Celui-ci peut-être décrit en combinant les équations des phénomènes de transport auquel il faut ajouter un terme exprimant les apports latéraux de silice par les petits affluents et un terme de consommation de la silice par les

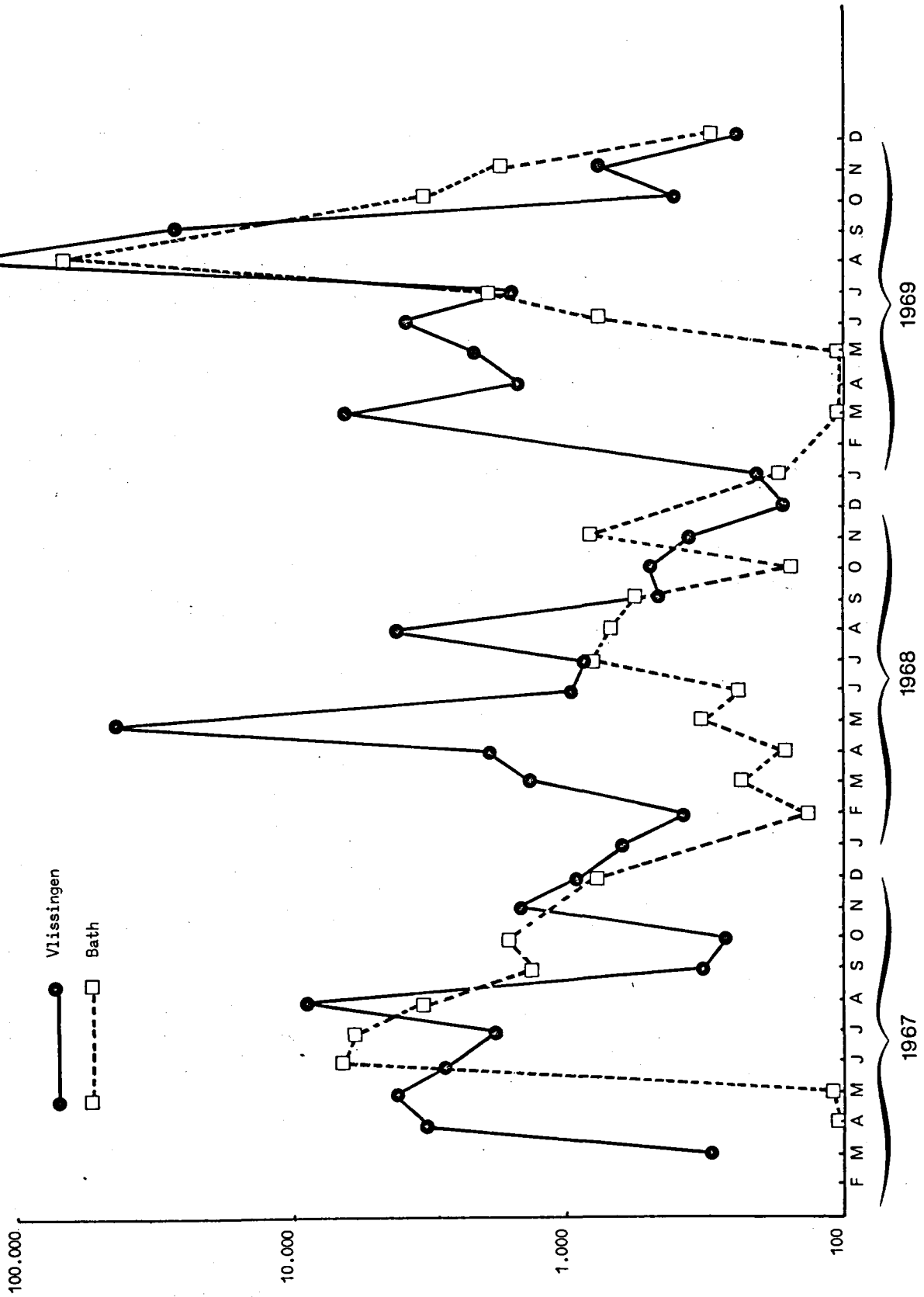


fig. 6.  
Diatomées [De Pauw (1975)]

diatomées que nous avons considéré comme étant simplement proportionnel à la population des diatomées ( $k c_D$ ) :

$$-\varepsilon \frac{d^2 c}{dx^2} + \frac{1}{\sigma} \frac{dc}{dx} (-\varepsilon \frac{d}{dx} - V) + \frac{1}{\sigma} \frac{dV}{dx} (c - c') + k c_D = 0$$

où  $c'$  est la concentration en silice dissoute dans les eaux douces des affluents,  $V$  est le débit d'eau douce et  $\sigma$  la section latérale. Les valeurs de  $c_D$  sont extraites du travail de De Pauw. Les courbes obtenues par intégration de cette équation à l'aide d'un calculateur analogique, sont représentées dans la figure 7. Elles sont comparées aux variations extrêmes de concentration en silice observées par De Pauw au cours d'une année.

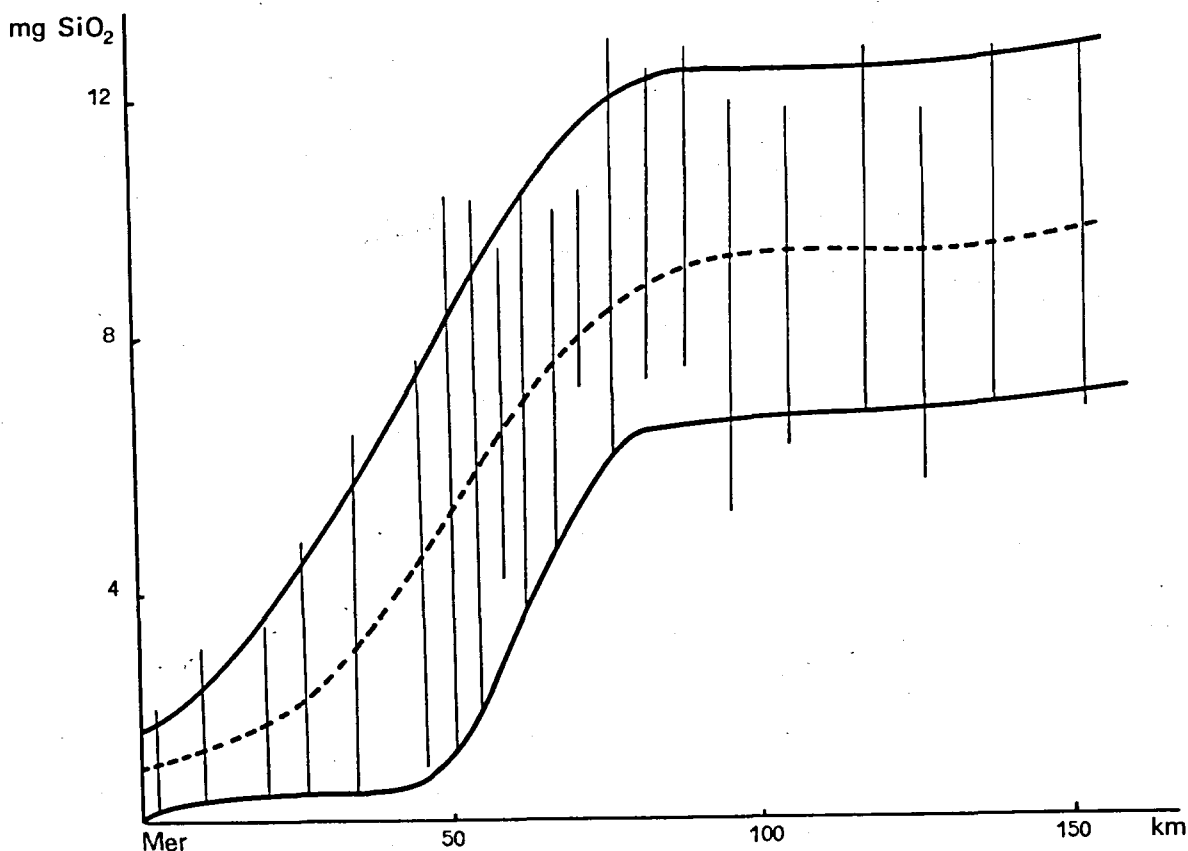


fig. 7.

Profils de silice dissoute dans l'estuaire. Les barres représentent les variations locales relevées par De Pauw (1975). Les courbes ont été tracées par le calculateur analogique en simulant la situation en hiver (courbe supérieure), en été (courbe inférieure) et une situation moyenne (courbe intermédiaire).

La courbe supérieure correspond à une activité des diatomées pratiquement nulle dans l'ensemble de l'estuaire. Par contre la courbe inférieure a été obtenue en simulant une activité des diatomées dix fois supérieure dans une région restreinte comprise entre Zandvliet et Hansweert. Cette situation correspond en fait à un *bloom* de diatomée tel qu'on peut l'observer dans la figure 6. Les courbes calculées à l'aide du modèle sont en excellent accord avec la distribution de la silice observée et expliquent bien, en particulier, l'évolution saisonnière des profils de concentration de silice dans l'estuaire.

Nous avons d'autre part cherché à établir des vérifications expérimentales plus quantitatives de l'action des diatomées dans l'estuaire.

Nous avons tout d'abord procédé à des mesures de productivité primaire par incorporation de  $^{14}\text{C}$  sur la fraction du microplancton, que nous avons comparées à la consommation de silice déduite des profils de concentration longitudinaux (fig. 8).

Entre le km 65 et 35, la productivité moyenne potentielle, mesurée en septembre, est voisine de  $10 \text{ mg C/m}^3 \cdot \text{h}$ .

En tenant compte de la profondeur de la zone photique estimée d'après les disques de Secchi et une durée d'ensoleillement de 10 heures, on obtient une production primaire de  $50 \text{ mg C/m}^2 \cdot \text{jour}$ . D'après Lisitzin (1972) le rapport pondéral  $\frac{\text{SiO}_2}{\text{C}}$  valant 2,3 pour une population de diatomées, on peut en déduire que l'activité du microplancton correspondrait à une consommation de silice égale à  $115 \text{ mg SiO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{jour}$ . D'après les flux de silice dans l'estuaire à la même époque et en tenant compte des apports latéraux, on peut estimer la consommation de silice dans la zone considérée à  $138 \text{ mg SiO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{jour}$ . Un calcul similaire effectué sur la section comprise entre le km 65 et l'embouchure, donne respectivement  $91 \text{ mg SiO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{jour}$  calculé d'après les mesures de productivité et  $96 \text{ mg SiO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{jour}$  d'après le flux de silice. Au mois de juin, lorsque la consommation est maximum, on calcule de la même manière une consommation en silice de  $210 \text{ mg SiO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{jour}$ . Des mesures de productivité au mois d'octobre montre une chute brutale de l'activité des diatomées qui ne correspond plus qu'à une consommation de silice de l'ordre de  $20 \text{ mg SiO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{jour}$ .

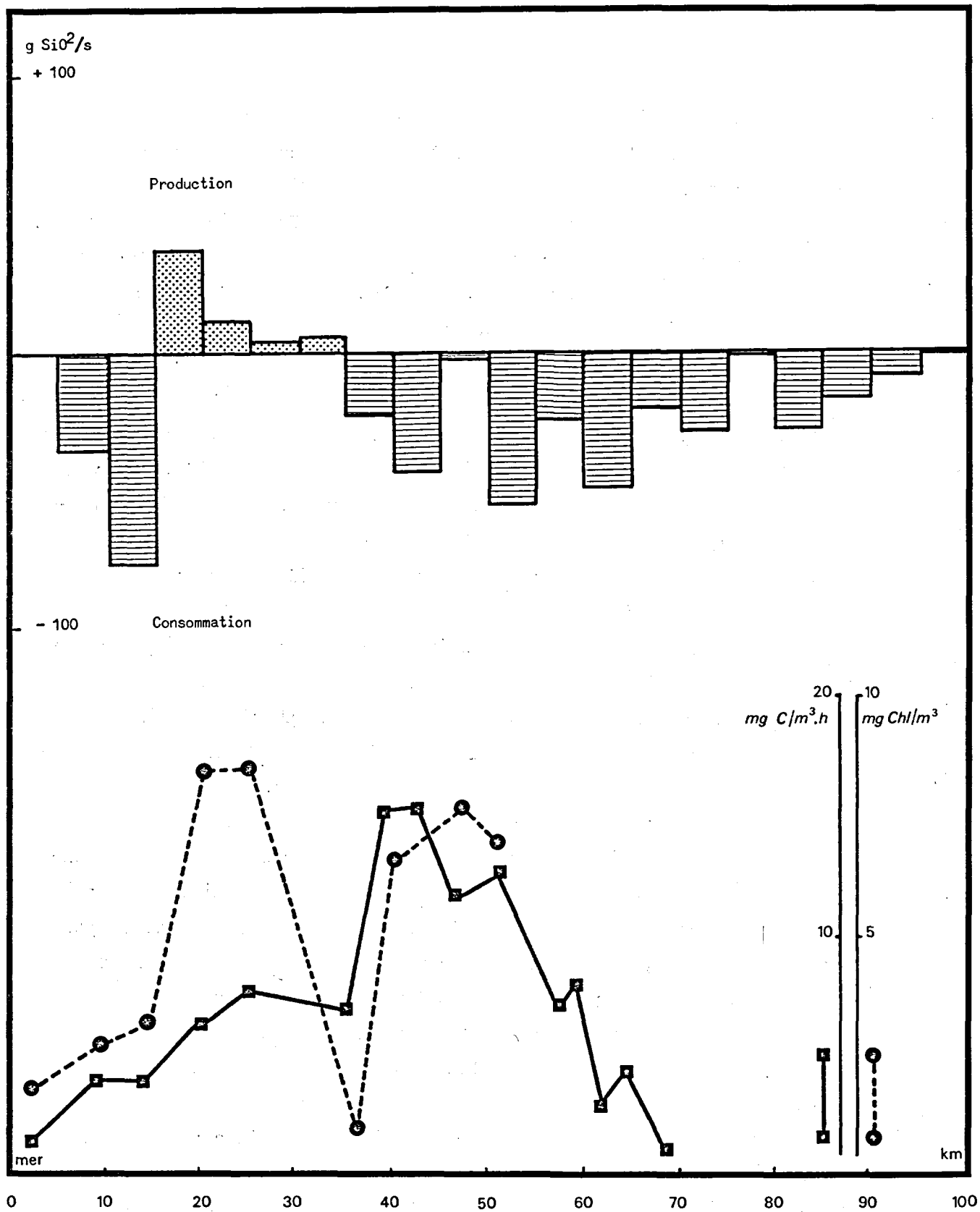


fig. 8.

Production et consommation de silice dissoute dans l'Escaut (septembre 1973)

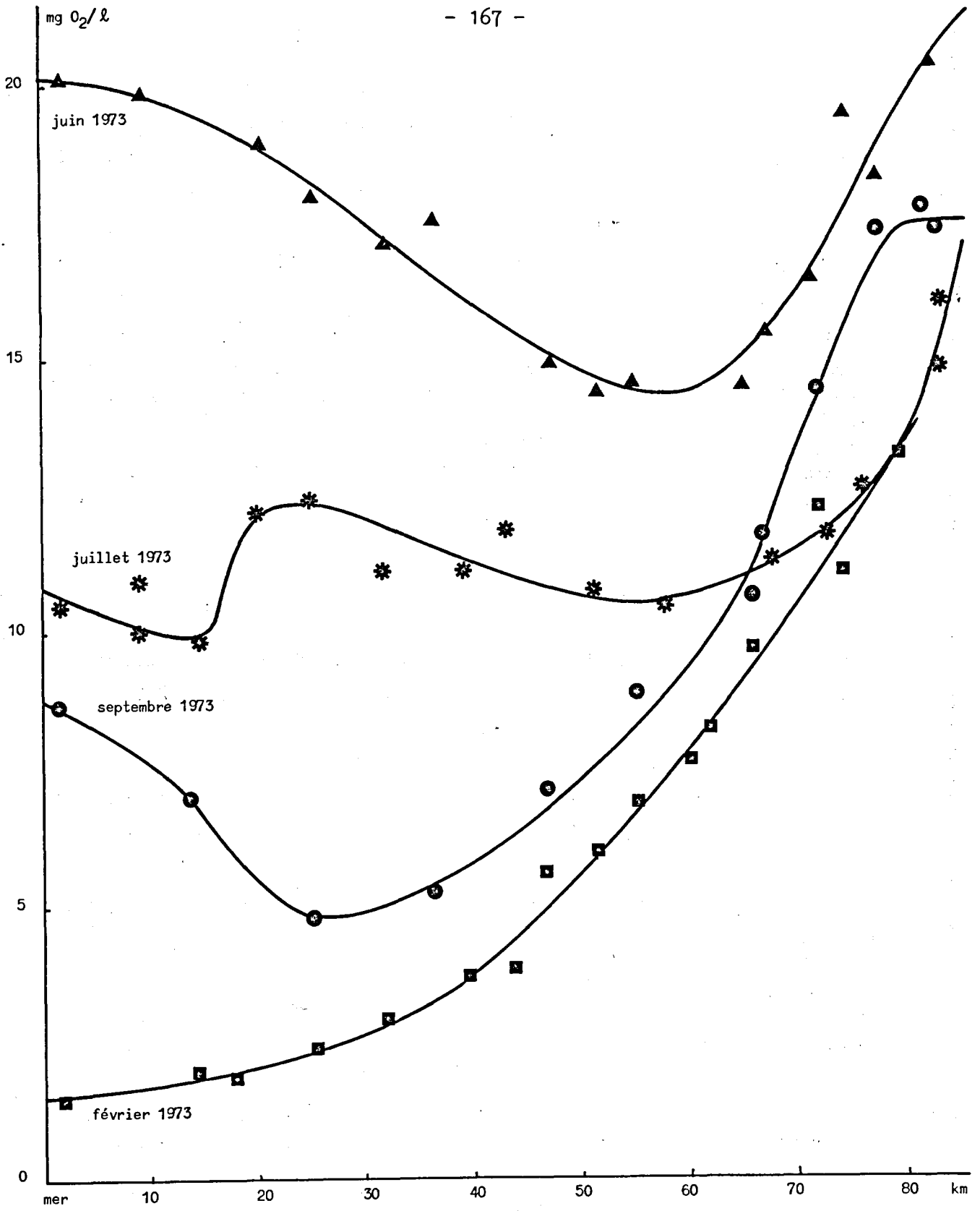


fig. 9.

Oxydation par  $\text{KMnO}_4$  (4 heures)

Ces résultats sont d'autre part en remarquable accord avec ceux obtenus par Peterson *et al.* (1971) dans la baie de San Fransisco où l'on observe une consommation de  $250 \text{ mg SiO}_2/\text{m}^2\text{jour}$  durant la période d'été au cours de laquelle se développe les blooms de diatomée.

Le développement important de l'activité du plancton pendant la période favorable se traduit par une production de matière organique considérable dans la zone aval de l'estuaire. La figure 9 montre l'évolution de la matière organique, mesurée par oxydation au  $\text{KMnO}_4$ , dans cette partie de l'estuaire pour quatre situations caractéristiques. En janvier, on observe la diminution de matières organiques due à la dilution par l'eau de mer et la dégradation bactérienne. L'activité planctonique se traduit par un accroissement considérable de la masse de matières organique dans la zone estuarienne marine.

##### 5.- Discussion des résultats

L'ensemble des résultats que nous avons décrit ci-dessus permet d'attribuer sans équivoque la consommation de silice observée à une activité intense des diatomées lorsque l'intensité lumineuse est suffisante pour assurer la photosynthèse. La turbidité élevée et les conditions anaérobiques inhibent cette activité dans la partie amont de l'estuaire. Par contre, dès que la pénétration lumineuse devient suffisante, on assiste à un développement progressif du phytoplancton facilité par les teneurs élevées en substances nutritives. La progression du développement de l'activité des diatomées de l'embouchure vers l'amont s'explique par l'évolution de la turbidité dans l'estuaire. Les substances nutritives étant largement en excès, on peut supposer que le seul facteur limitant est l'énergie lumineuse. Le développement des diatomées débute donc à l'embouchure où la turbidité est minimum dès que l'ensoleillement est suffisant. Il se déplace ensuite progressivement vers l'amont au cours de l'été par suite de l'augmentation de l'énergie lumineuse reçue et de la consommation totale de silice dans la partie aval de l'estuaire.

La décharge de quantités importantes de substances azotées et phosphorées dans la rivière conduit d'autre part à un déséquilibre nutritif



du système qui se marque par une carence en silice dissoute. Celle-ci est rapidement et complètement consommée lorsque l'activité du phytoplancton se développe. C'est la raison pour laquelle l'Escaut, comme le Rhin se distingue des autres estuaires décrits, par une consommation massive de la silice dissoute transportée par les eaux douces.

La même remarque s'applique à la baie de San Fransisco que l'on peut considérer comme la zone estuarienne des rivières Sacramento et San Joaquin.

Ce comportement inhabituel a des implications écologiques importantes, non seulement pour l'estuaire, mais aussi pour l'équilibre naturel des espèces en mer du Nord.

Pour l'estuaire, on peut en effet considérer que la partie aval est dans un état eutrophisé; l'excès d'azote et de phosphore permet un développement abondant des diatomées et, lorsque toute la silice dissoute est consommée, d'autres organismes telles que les flagellés, myxophycées chlorophycées se développent à leur tour [De Pauw (1975)]. La production nette de matières organiques associée à cette activité est considérable et peut atteindre, d'après nos estimations, 125 tonnes de C par jour. La plus grande partie de cette matière organique transite vers la mer du Nord.

#### Références

- BANOUB, M.W. et BURTON, J.D. (1968). The winter distribution of silicate in Southampton Water, *J. Cons. Perma. Int. Explor. Mer*, 32, 201-208.
- BIEN, G.S., CONTOIS, D.E. et THOMAS, W.H. (1958). The removal of soluble silica from fresh water entering the sea, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 14, 35-54.
- BURTON, J.D., LISS, P.S. et YENUGOPALAN, V.K. (1970). The behaviour of dissolved silicon during estuarine mixing, I, *J. Cons. Perma. Explor. Mer*, 33, 134-140.
- BURTON, J.D. et LISS, P.S. (1973). Processes of supply and removal of dissolved silicon in the oceans, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 1761-1773.
- DE PAUW, C. (1975). *Bijdrage tot de kennis van milieu en plancton in het Westerschelde estuarium*, Thèse de Doctorat, Rijksuniversiteit Gent.

- FANNING, K.A. et PILSON, M.E.Q. (1973). The lack of inorganic removal of dissolved silica during river-ocean mixing, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 2405-2416.
- LISITZIN, A.P. (1972). Sedimentation in the world ocean, *Soc. of Econ. Paleon. and Mineralog.*, Special Public., 17.
- LISS, P.S. et SPENCER, C.P. (1970). Abiological processes in the removal silicate from sea water, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34, 1073-1088.
- MACKENZIE, F.T. et GARRELS, R.M. (1966). Chemical massbalance between rivers and oceans, *Am. J. Sci.*, 264, 507-525.
- MACKENZIE, F.T., GARRELS, R.M., BRICKER, O.P. et BIEKLEY, F. (1967). Silica in sea water : Control by silicate minerals, *Science*, 155, 1404-1405.
- PETERSON, D.H., CONOMOS, T.J., BROENKOW, W.W. et DOHERTY, P.C. (1971). Estimated rates of biological silica utilisation, San Francisco Bay Estuary, *Am. Geophys. Union Trans.*, 52, 259.
- STEFANSSON, J.D.H. et RICHARDS, F.A. (1963). Processes contributing to the nutrient distributions of the Columbia River and Strait of Ivan de Fuca, *Limnol. Oceanograph.*, 8, 394-410.
- VAN BENNEKOM, A.J., KRIJGSMAN-VAN HARTINGSVELD, E., VAN DER VEER, G.C.M., VAN VOORST, H.F.J. (1974). The seasonal cycles of reactive silicate and suspended diatoms in the Dutch Wadden Sea, *Neth. J. of Sea Res.*, 8 (2-3), 174-207.
- WOLLAST, R. et DE BROEU, F. (1971). Study of the behaviour of dissolved silica in the estuary of the Scheldt, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 35, 613-620.
- WOLLAST, R. et GARRELS, R.M. (1971). Diffusion coefficient of silica in seawater, *Nature phys. Sc.*, 229, 3, p.94.