

VARIATIONS TEMPORELLES DES SELS NUTRITIFS ET DES PIGMENTS CHLOROPHYLLIENS DANS L'EAU INTERSTITIELLE D'UNE VASE ESTUARIEENNE DE BRETAGNE NORD

par

Catherine Riaux-Gobin

Station biologique
O.E.O.B.M. 29211 Roscoff.

Résumé

Les variations de concentrations en sels minéraux (NH_4 , NO_2 , NO_3 , PO_4 et SiO_2), en salinité et en pigments chlorophylliens (chlorophylle *a* et phéopigments) ont été suivies dans l'eau interstitielle d'une vase estuarienne à deux échelles différentes au cours du temps : au cours de 17 mois consécutifs, en 1979-1980 et au cours d'un cycle de marée (vive-eau estivale). Pour certains de ces paramètres, des variations saisonnières bien marquées apparaissent, comportant soit un maximum estival (salinité et pigments), soit un maximum hivernal (silicates et phosphates) ; d'autre part silicates et phosphates dissous évoluent parallèlement et sont, en grande partie, inversement corrélés aux pigments. Nitrates et nitrites sont toujours présents à de fortes concentrations (jusqu'à $1.000 \mu\text{atg.l}^{-1}$ pour NO_3). Des gradients verticaux de concentration en sels dissous existent au sein de ce sédiment : nitrates et nitrites présentent ainsi des concentrations plus élevées dans les strates supérieures tandis que phosphates et ammonium s'accumulent dans les strates inférieures et sont, en général, présents à de plus fortes concentrations dans l'eau interstitielle que dans l'eau estuarienne sus-jacente. Le rapport N/P moyen est beaucoup plus faible dans l'eau interstitielle que dans l'eau sus-jacente et atteste de l'accumulation préférentielle des phosphates dans le sédiment.

Les variations de ces paramètres sont également **importantes** au cours d'un cycle de marée et montrent la nécessité de réaliser les prélèvements mensuels à un moment déterminé du cycle de marée.

Introduction

L'importance du rôle joué par le sédiment dans l'enrichissement en sels nutritifs de l'eau sus-jacente, en milieu côtier, a été démontrée par de nombreux auteurs. Selon Boynton *et al.* (1982), il se produit un flux vers le sédiment en hiver, alors que l'eau est très riche en sels nutritifs et que la demande biologique est faible; en été, le flux s'inverse et le sédiment « relargue » des sels nutritifs vers l'eau appauvrie à cette époque et dont la demande est alors forte. Fisher *et al.* (1982) démontrent ainsi que le sédiment apporte jusqu'à 35 p. 100 de l'azote et du phosphore requis pour la production du système côtier; de même, Callender et Hammond (1982) prouvent que le flux d'ammonium, en provenance du sédiment est assez important pour alimenter la production primaire du fleuve Potomac.

Malgré la prépondérance, dans les estuaires du Nord Finistère, des apports d'origine fluviaux, principalement en azote minéral (Riaux, 1977; Wafar, 1981), les concentrations très importantes en sels nutritifs de l'eau interstitielle des vasières exondables méritent d'être considérées avec attention. Zeitzschel (1981), dans une revue très documentée, montre ainsi l'importance des interactions sédiment-eau dans la dynamique des sels nutritifs des écosystèmes peu profonds.

Dans les milieux estuariens, où le marnage est exceptionnellement important (jusqu'à 9 m en vives-eaux), tels ceux du Nord Finistère, un sédiment de bas niveau marégraphique peut être recouvert à basse mer par des masses d'eau dessalées (salinité < 10 p. 1.000) et 6 heures plus tard par des masses d'eau typiquement marines (salinité > 34 p. 1.000). Ces sédiments sont également soumis aux remises en suspension par les forts courants de marée et subissent les effets de l'alternance émergence-immersion. Un autre facteur d'importance est la bioturbation.

Avant d'aborder des études de flux à l'interface eau-sédiment dans un milieu où les facteurs physiques et chimiques environnants ont des amplitudes de variations importantes, il est indispensable de connaître les variations, à court et long terme des gradients instantanés au sein de ce sédiment. C'est pourquoi cette étude regroupe des résultats concernant d'une part un cycle de marée, d'autre part, les variations d'un mois sur l'autre (à marée basse) durant plus d'un an.

Les paramètres étudiés concernent la salinité, plusieurs sels minéraux, la chlorophylle a et les phéopigments. Les méthodes d'extraction, de congélation et de dilution des échantillons, employées lors de ce travail, répondent imparfaitement à une étude fine de la chimie du sédiment. Mais, le but était seulement d'évaluer, de manière préliminaire, les variations les plus remarquables pour les comparer ultérieurement à d'autres éléments tels les pigments ou la production primaire du sédiment total.

I. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Station et prélèvements

Le site de prélèvement est localisé au débouché du Dourduff, rivière de faible débit (moyenne $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); le sédiment étudié est une vase intertidale ou slikke, située à hauteur de mi-marée. Cette étude sur l'eau interstitielle du sédiment a été effectuée en parallèle à d'autres travaux concernant la chimie du sédiment, la bactériologie et la méiofaune (Boucher *et al.*, 1982 et 1983) et le microphytobenthos (Riaux, 1983). Les prélèvements ont été réalisés mensuellement de septembre 1979 à janvier 1981 par carottages manuels à marée basse avec des carottiers de plexiglas de 5,4 cm de diamètre intérieur. Le sédiment a été recueilli sur une épaisseur d'une dizaine de centimètres et fractionné, au laboratoire, en six catégories dimensionnelles : 0-0,5;

0,5-1; 1-2; 2-4; 4-6 et 6-8 cm. Une série de cinq prélèvements a également été réalisée au cours d'une marée estivale (le 1-7-1980); seules les fractions 0-0,5; 0,5-1; 1-2 et 2-4 cm ont alors été étudiées.

Extraction

L'extraction de l'eau interstitielle a été menée au laboratoire, environ 1 heure après le prélèvement, à l'aide d'une presse manuelle, suivant une technique utilisée à la Station biologique de Roscoff pour la bactériologie et la chimie des sédiments (S. Chamroux, comm. pers.). Cette technique a été retenue pour sa facilité de mise en œuvre; cependant, malgré la rapidité de la manipulation et les soins apportés pour ne pas contaminer les échantillons, la méthode d'extraction à l'air libre est imparfaite. Tout d'abord l'efficacité des filtres utilisés (grilles d'acier et soie Nytex de 20 μm de vide de maille) n'a pas été contrôlée : le diamètre moyen des particules entraînées dans l'eau interstitielle extraite n'est donc pas connue. En général, des méthodes d'extraction plus sophistiquées sont utilisées : centrifugation pour les vases et filtration sous pression pour les sables (cf. Vanderborght et Billen, 1975; Podamo, 1974; Baglinière *et al.*, 1980; Klump et Martens, 1981 ou Henriksen *et al.*, 1981). Le deuxième point important concerne les risques d'oxydation et de précipitation de certains composés chimiques lors d'une extraction à l'air libre (Bray *et al.*, 1973; Klump et Martens, op. cit.); c'est pourquoi plusieurs auteurs effectuent ces extractions sous gaz inerte, azote (Rutgers van der Loeff *et al.*, 1981 ou Callender et Hammond, 1982) ou fréon (Montgomery *et al.*, 1979). Cependant, le sédiment étudié ici contient des teneurs très élevées en sels minéraux dissous; les phénomènes d'oxydation lors de l'extraction ont donc été tenus pour négligeables.

Traitement

L'eau interstitielle (quelques cm^3), recueillie pour chaque fraction de la colonne de sédiment, a été immédiatement congelée.

— Les sels minéraux dissous ont été dosés par les méthodes suivantes : méthode de Murphy et Riley (1962) pour PO_4 , Koroleff (1969 et 1970) pour NH_4 , Wood *et al.* (1967) pour NO_3 , Bendschneider et Robinson (1952) pour NO_2 et enfin Mullin et Riley (1962) pour SiO_2 . Juste avant le dosage, les échantillons ont été dilués avec de l'eau de mer appauvrie, testée pour chaque sel nutritif. Mis à part l'ammonium, dosé manuellement, les dosages ont été effectués à l'auto-analyseur Technicon II, suivant les mises au point et les recommandations de Tréguer et Le Corre (1975).

— La salinité a été évaluée simplement, par réfractométrie (avec une précision faible, de l'ordre de 1 p. 1000).

— La chlorophylle *a* et les phéopigments ont été dosés suivant la méthode fluorimétrique de Yentsch et Menzel (1963) sur fraction brute extraite; un fluorimètre Turner 111, muni d'un photomultiplicateur R 136, a été utilisé.

II. VARIATIONS SAISONNIÈRES

En vue de l'étude des variations saisonnières, les prélèvements de sédiment ont toujours été effectués à l'étales de basse mer. Par contre, le coefficient de la marée en cours, dont on a déjà noté l'importance pour les variations à court terme des pigments (Riaux, 1982), n'a pas toujours été le même.

La salinité de l'eau interstitielle présente un gradient négatif de la surface vers le fond. Ceci traduit l'évaporation durant l'émersion. Une évolution en fonction du temps apparaît également : en hiver et au printemps les salinités sont inférieures à 30 p. 1.000, par contre, en été, elles sont supérieures à 35 p. 1.000 jusqu'à 8 cm de profondeur et elles atteignent des valeurs élevées (> 40 p. 1.000) en surface. Ces variations suivent globalement les variations hydroclimatiques locales.

Les concentrations en chlorophylle *a* dosées dans l'eau interstitielle évoluent régulièrement (Fig. 1); un maximum s'individualise en fin d'été ($> 300 \mu\text{g.l}^{-1}$), encadré par des périodes plus pauvres ($< 100 \mu\text{g.l}^{-1}$). La chlorophylle *a* se répartit dans la colonne de sédiment suivant un gradient négatif « surface-fond » bien marqué : les plus fortes valeurs se localisant en surface, excepté en novembre 1980 où une valeur plus élevée s'observe dans la fraction 4-6 cm. La chlorophylle *a* dite « active » est encore présente à 8 cm de profondeur : 100 à $200 \mu\text{g.l}^{-1}$ soit $0,2 \mu\text{g.cm}^{-3}$ d'eau interstitielle. Les références bibliographiques sont, semble-t-il, inexistantes à ce sujet. Cependant, ces valeurs pigmentaires assez élevées peuvent être attribuées à la présence, dans l'eau extraite du sédiment, de microphytes épipélés de très petite taille ($\leq 10\text{-}20 \mu\text{m}$); lors d'une présentation antérieure concernant la répartition verticale et les variations au cours du temps du microphytobenthos épipélé (à partir du sédiment total), il a été

TABLEAU 1

Amplitude des variations de certains paramètres dans l'eau interstitielle (1979-1980) et dans l'eau sus-jacente (moyenne sur 8 h le 20.12.1979 et sur 8 h le 6.9.1979).

	Eau interstitielle : $\bar{x} \pm \sigma$		Eau sus-jacente	
	0-0,5 cm	6-8 cm	Été	Hiver
Salinité (p. 1.000)	$34,0 \pm 4,9$	$31,4 \pm 4,1$	$29,4 \pm 9,2$	$17,4 \pm 14,3$
Chl. <i>a</i> ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	348 ± 429	129 ± 140	$12,0 \pm 5,0$	$10,3 \pm 11,4$
Phéo. ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	513 ± 397	358 ± 309	$11,5 \pm 11,3$	$23,2 \pm 23,9$
SiO ₂ ($\mu\text{atg.l}^{-1}$)	$3,08 \pm 2,43$	$7,01 \pm 4,15$	$1,3 \pm 1,1$	$4,9 \pm 3,8$
PO ₄ ($\mu\text{atg.l}^{-1}$)	65 ± 52	373 ± 696	$3,3 \pm 2,7$	$2,8 \pm 1,7$
NH ₄ ($\mu\text{atg.l}^{-1}$)	70 ± 38	208 ± 169	$1,4 \pm 1,0$	$27,0 \pm 12,0$
NO ₂ ($\mu\text{atg.l}^{-1}$)	$9,23 \pm 4,57$	$7,89 \pm 5,28$	$1,2 \pm 1,0$	$2,1 \pm 1,0$
NO ₃ ($\mu\text{atg.l}^{-1}$)	466 ± 376	351 ± 343	211 ± 123	907 ± 631
(NO ₂ /NO ₃) moyen	1/50	1/44	1/176	1/432
(NH ₄ /NO ₃) moyen	1/6,7	1/1,7	1/151	1/34
(N/P) moyen	8,4/1	1,5/1	65/1	334/1

noté la présence de diatomées de très petites tailles appartenant aux genres *Navicula* et *Nitzschia*; ces très petits organismes chlorophylliens, surtout présents durant les mois d'été, peuvent donc être

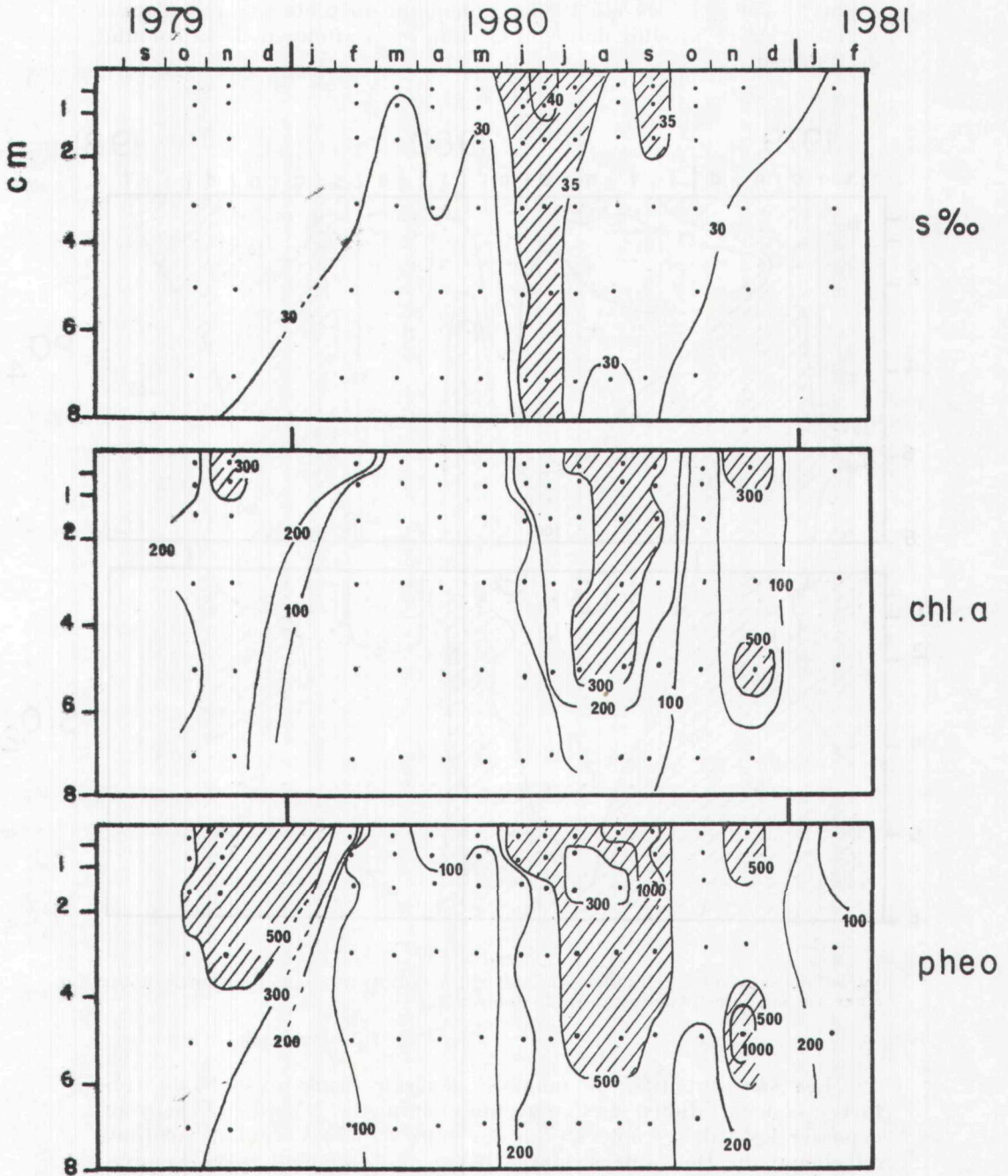


FIG. 1

Variations saisonnières de la salinité (p. 1,000), de la chlorophylle *a* et des phéopigments ($\mu\text{g.l}^{-1}$) dans l'eau interstitielle d'une vasière intertidale (estuaire du Dourduff).

entraînés dans l'eau interstitielle. Aucun contrôle n'a toutefois été effectué afin de dénombrer et reconnaître ces éventuels microphytes.

Les concentrations en phéopigments de l'eau extraite sont très importantes, environ le double des valeurs en chlorophylle a (maximum : $1.200 \mu\text{g.l}^{-1}$ en été 1980); cependant on n'observe pas d'accumulation de ce produit de dégradation en profondeur de la colonne de sédiment.

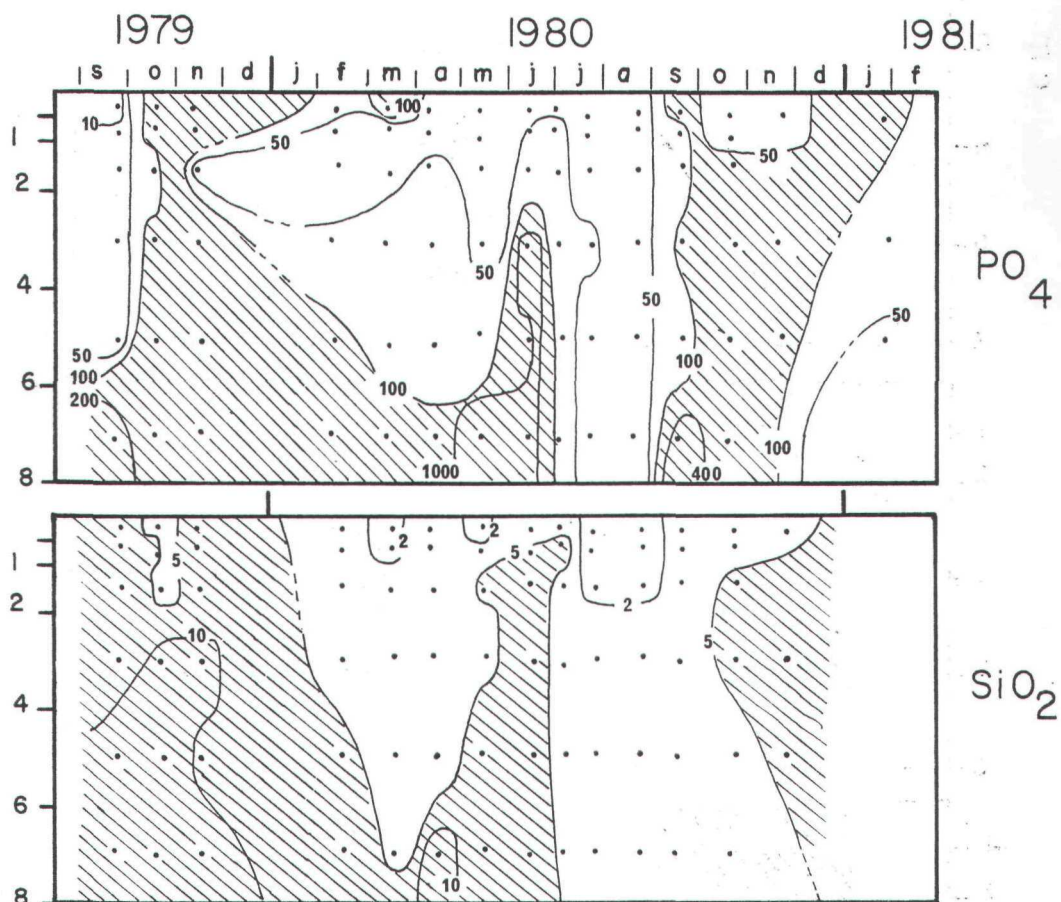


FIG. 2

Variations saisonnières des phosphates et silicates ($\mu\text{atg.l}^{-1}$) dans l'eau interstitielle d'une vasière intertidale (estuaire du Dourduff).

Les sels nutritifs, de manière générale, sont présents en très fortes concentrations. Les moyennes annuelles (Tabl. 1) peuvent dépasser les valeurs notées pour les eaux douces s'écoulant au fond du chenal du Dourduff à marée basse, et atteignent, par exemple, des concentrations proches de $500 \mu\text{atg.l}^{-1}$ pour les nitrates. La répartition verticale est différente pour chacun des sels considérés : on observe une accumulation très importante en profondeur (6-8 cm)

pour l'ammonium et les phosphates (augmentation d'un facteur 4),
cette accumulation est moins importante pour les silicates (facteur 2) ;
pour les nitrites et les nitrates la répartition verticale est relativement

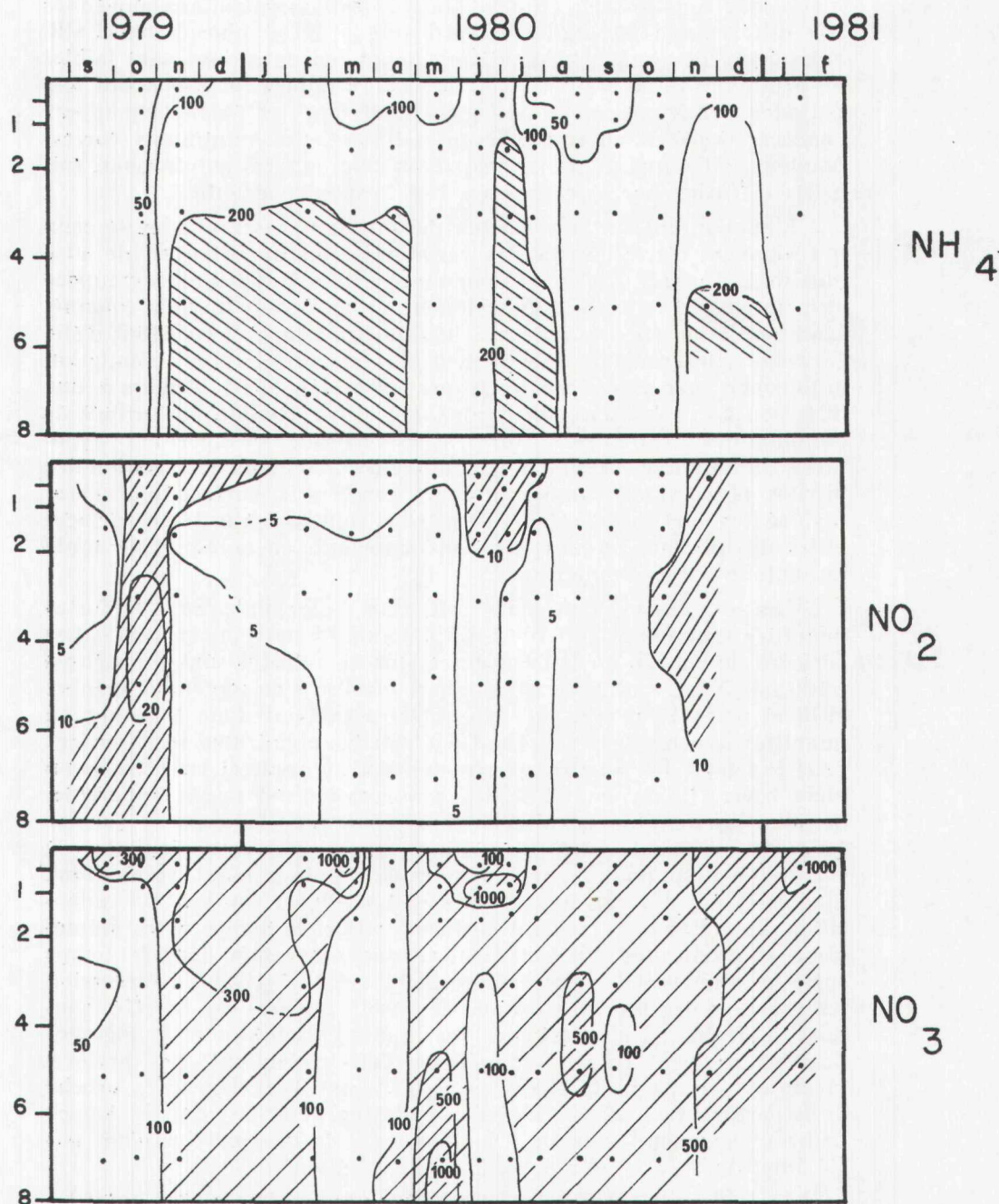


FIG. 3

Variations saisonnières de l'ammonium, des nitrites et nitrates ($\mu\text{atg.l}^{-1}$) dans l'eau interstitielle d'une **vasière** intertidale (estuaire du Dourduff).

homogène avec une légère tendance à une accumulation de surface (Tabl. 1). On observe, pour tous ces sels, une évolution au cours des saisons, mais les schémas de variation sont différents pour chacun d'eux, mis à part des concentrations globalement plus importantes en hiver pour tous les sels étudiés. Malgré des concentrations moyennes très différentes ($100 \mu\text{atg.l}^{-1} \text{PO}_4$ et $5 \mu\text{atg.l}^{-1} \text{SiO}_2$), phosphates et silicates évoluent de manière similaire. Leurs concentrations sont faibles au printemps et en été (Fig. 2). Ces valeurs faibles correspondent aux périodes riches en pigments du sédiment total, et partiellement aux concentrations en chlorophylle interstitielle. Ces minimums correspondent soit à une assimilation par les microphytes autotrophes, soit à une diffusion par « relargage » vers l'eau surnageante.

L'ammonium suit un schéma de variation assez proche de ceux qui viennent d'être décrits; les variations sont importantes (de 50 à plus de $200 \mu\text{atg.N.l}^{-1}$). Les valeurs inférieures à 100 sont regroupées au printemps à la surface du sédiment, et en été sur toute la colonne. L'accumulation en profondeur a lieu au printemps et en début d'été. Là encore, le gradient observé peut correspondre à une assimilation autotrophe (par les microphytes par exemple), aussi bien qu'à une diffusion à ces époques, ou encore une minéralisation en surface de l'ammonium en nitrites et nitrates. Corroborant cette dernière hypothèse, on note une certaine opposition entre le schéma de variation des nitrites et celui de l'ammonium. Le gradient « surface-fond » est inversé (les plus fortes valeurs de nitrites sont en majorité en surface) et les nitrites sont en concentration importante en automne sur toute la hauteur du sédiment.

Les nitrates existent, dans cette vase intertidale, en très fortes quantités (maximum supérieur à $1.000 \mu\text{atg.l}^{-1}$, en janvier 1981). Les périodes de l'année où les concentrations en nitrates sont inférieures à $100 \mu\text{atg.N.l}^{-1}$, sont de courte durée et localisées en septembre-octobre 1979 et mars 1980 (Fig. 3). Les nitrates existent donc toujours en quantités non négligeables. En 1979, nitrites et nitrates se succèdent dans le temps, les nitrites apparaissent en automne et les nitrates en plein hiver. En hiver 1980-1981, la succession est moins apparente, de plus les données de nitrites manquent pour le mois de janvier 1981. On ne peut donc pas décrire, à partir de ces résultats, de succession nette pour les trois formes de l'azote minéral, ammonium, nitrites et nitrates; on peut simplement souligner une certaine opposition, dans l'espace (gradient surface-fond) et le temps, entre ammonium et nitrites en 1979 et 1980 et une succession dans le temps entre les nitrites et les nitrates durant l'hiver 1979-1980. La succession temporelle entre les trois formes de l'azote minéral est en effet soumise à de nombreux facteurs physiques, chimiques et biologiques dont on ne peut ici que commenter l'effet résultant. Les prélèvements ont, de plus, été effectués pendant une période encore proche de la perturbation consécutive à la pollution pétrolière de l'« Amoco Cadiz » et pendant laquelle les « blooms » de microphytes n'ont pas été importants.

Le tableau 1 permet d'effectuer quelques comparaisons entre les concentrations moyennes en sels nutritifs de l'eau interstitielle et de l'eau sus-jacente. Les concentrations en nitrites de l'eau interstitielle sont quantitativement faibles en moyenne ($9 \mu\text{atg.l}^{-1}$) et le rapport

moyen NO_2/NO_3 , pour la fraction 0-0,5 cm, est relativement proche de celui noté dans l'eau sus-jacente en été. Par contre, les concentrations importantes de nitrates observées dans les apports estuariens hivernaux ne se traduisent pas par une accumulation proportionnelle dans le sédiment.

Le rapport azote/phosphore ($\text{NH}_4 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3/\text{PO}_4$) est, en moyenne, voisin de 8 pour les 5 premiers mm du sédiment et plus faible dans les strates sous-jacentes. Ces valeurs sont beaucoup plus faibles que celles notées dans l'eau surnageante, ce qui suggère une accumulation préférentielle des phosphates dans ces sédiments. Cette remarque va dans le sens des hypothèses proposées au sujet de la non-conservativité des phosphates dans les eaux estuariennes du Dourduff (Riaux-Gobin, 1985) ; les phosphates, présents dans les masses d'eau, seraient piégés par le seston et, après sédimentation, participeraient à l'enrichissement du sédiment en ce sel; d'après nos estimations antérieures, l'estuaire du Dourduff importerait des phosphates aussi bien en été qu'en hiver alors que silicates et nitrates seraient exportés vers la baie en hiver.

De manière générale, les sels nutritifs dissous comme d'ailleurs les pigments chlorophylliens, existent en concentrations plus élevées dans le sédiment étudié que dans l'eau sus-jacente, excepté durant les marées basses hivernales pendant lesquelles les concentrations dans les eaux dessalées du jusant peuvent atteindre, pour les nitrates et les silicates, des valeurs supérieures à celles du sédiment sous-jacent.

Ce sont les phosphates et l'ammonium qui ont, dans le sédiment, les facteurs d'enrichissement les plus importants par rapport aux concentrations dans l'eau sus-jacente. Le sédiment se trouve donc être pour ces deux sels nutritifs, une réserve potentielle pouvant alimenter, ou générer, un flux vers l'eau surnageante à certaines périodes de l'année, ou sous certaines conditions de bioturbation ou de remise en suspension.

III. VARIATIONS AU COURS D'UNE MARÉE

Des prélèvements séquentiels de sédiment ont été effectués en été au cours d'une marée de vive eau (coef. 86) de mi-jusant jusqu'au début du flot. Les pigments n'ont pas été dosés dans l'eau interstitielle, ni les phosphates. Pour tous les prélèvements, seuls les 4 premiers cm ont été étudiés (Fig. 4).

La salinité de l'eau interstitielle évolue au cours du temps suivant un gradient surface-fond régulier, qui est fonction de la durée d'émersion. Les salinités augmentent à basse mer et aboutissent à une sursalure (> 40 p. 1.0001. Il y a concentration des chlorures à la surface du sédiment après 5 h d'émersion. On note également que les teneurs en eau du sédiment, dont il n'est pas présenté de figure ici, diminuent au cours de l'émersion. Plusieurs phénomènes peuvent

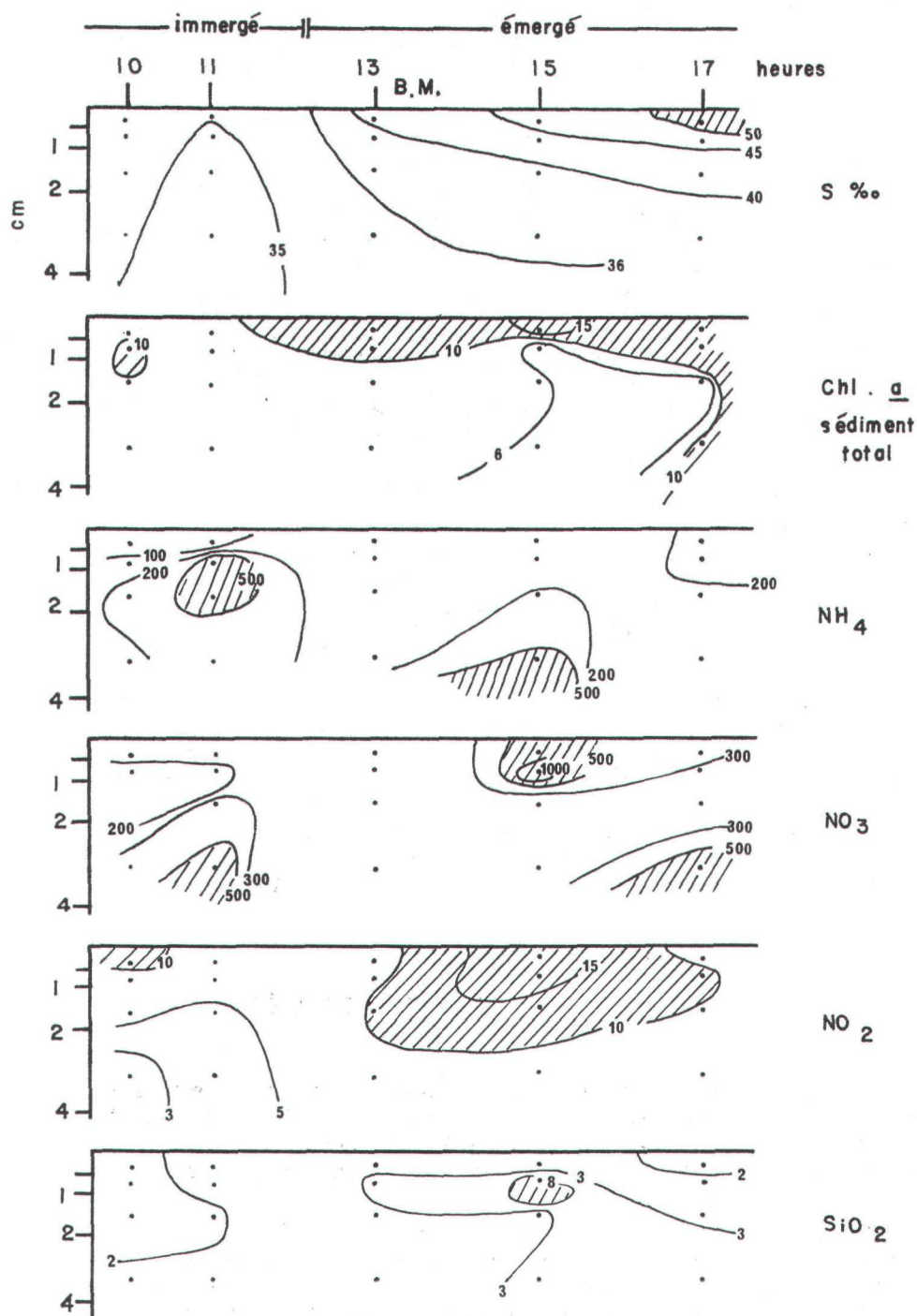


FIG. 4

Variations au cours d'une marée de divers paramètres; les sels minéraux sont exprimés en $\mu\text{atg.l}^{-1}$ eau interstitielle et la chlorophylle *a* en $\mu\text{g.g}^{-1}$ sédiment sec.

se conjuguer : écoulement de l'eau d'imbibition par gravité créant des sortes de « sources » au niveau de mi-marée et asséchant le sédiment au cours de l'émersion, et d'autre part, dessiccation par évaporation de surface. Le gradient de salinité semble prouver l'importance de l'évaporation.

Les concentrations en chlorophylle α du sédiment total évoluent au cours du temps (Fig. 4). Les deux prélèvements précédant l'étale de basse mer (10 h et 11 h) sont assez homogènes et les concentrations sont inférieures ou égales à $10 \mu\text{g.g}^{-1}$ sédiment sec; pour les prélèvements suivants, un gradient apparaît avec des valeurs plus élevées en surface du sédiment ($> 15 \mu\text{g.g}^{-1}$ à 15 h), contrebalancées par des concentrations plus faibles en profondeur. Cette évolution dans le temps du gradient surface-fond évoque une migration des pigments au moment de l'exondation ; cette accumulation pigmentaire de surface, à basse mer, est en accord avec les nombreux travaux sur le comportement du microphytobenthos (Round et Palmer, 1966; Harper, 1976; Round, 1971 et 1979).

Les sels nutritifs dosés dans l'eau extraite évoluent également au cours des phases de la marée, mais pas de manière cohérente (Fig. 4). Seuls les nitrites semblent évoluer graduellement et comportent un enrichissement notable en surface ($> 15 \mu\text{atg.l}^{-1}$) durant la période d'exondation. Les nitrates et les silicates se concentrent également à basse mer, mais de manière plus ponctuelle. On peut noter les répartitions quasi inverses entre l'ammonium et les nitrates, qui peuvent indiquer des gradients de minéralisation au sein du sédiment. Cette tendance à l'accumulation en surface pour les sels nutritifs lors de l'exondation du sédiment a été décrite par Oppenheimer et Ward (1963, in Zeitzschel, 1981).

TABLEAU 2

Amplitude des variations de certains paramètres dans l'eau interstitielle (*) et dans le sédiment total (**) lors d'une marée de vive-eau (1.7.1980) dans la fraction 0-0,5 cm.

	NO_3^* $\mu\text{atg.l}^{-1}$	NO_2^* $\mu\text{atg.l}^{-1}$	NH_4^* $\mu\text{atg.l}^{-1}$	SiO_2^* $\mu\text{atg.l}^{-1}$	Chl. a^{**} $\mu\text{g.g}^{-1} \text{ sec}$
Moyenne (\bar{x})	359	10,0	123	2,1	10,7
Ecart type (σ)	187	4,8	104	0,7	4,8

Lors de cette marée, les écarts types, σ , pour la fraction 0-0,5 cm sont assez importants (Tabl. 2). Les résultats montrent l'importance de la variabilité à court terme de certains paramètres d'une vase intertidale, comparée à la variabilité annuelle (Tabl. 1). Ceci prouve également l'importance d'un repérage rigoureux par rapport aux phases de la marée, lors des prélèvements mensuels. Ces remarques rejoignent celles de Stanley *et al.* (1980).

De tels prélèvements séquentiels à l'échelle d'une marée seraient à renouveler avant de pouvoir décrire avec fiabilité la dynamique des sels nutritifs au cours du passage immersion-émersion. Par ailleurs, les prélèvements manuels en plongée autonome sous 2 ou

3 m d'eau sont difficiles à réaliser, du fait des très forts courants de marée ($0,6 \text{ m.s}^{-1}$ en vives eaux, à mi-jusant); des prélèvements par carottage automatique à partir d'une embarcation au point fixe devraient améliorer ces tests à court terme.

IV. CONCLUSIONS

Ces résultats préliminaires, concernant quelques paramètres de l'eau interstitielle d'une vase estuarienne, permettent de décrire les gradients verticaux au sein du sédiment, et d'esquisser les variations à deux échelles de temps.

La salinité évolue au cours des saisons de manière relativement cohérente et prédictible; l'augmentation des salinités interstitielles en période estivale a déjà été observée et décrite (Morris *et al.*, 1982). L'eau surnageante confère au sédiment une salinité moyenne qui évolue avec les saisons. Par contre, la sursalure importante ($> 40 \text{ p.p. 1.000}$) observée ici en été peut être le témoin d'une évaporation intense affectant ces vasières durant les marées basses diurnes. Les concentrations pigmentaires (Chl. *a* et phéopigments) des eaux interstitielles varient au cours des saisons suivant un schéma proche de celui des salinités. Les concentrations maximales se rencontrent en été et sont l'indice probable d'une activité photosynthétique accrue ou du développement d'un peuplement spécifique durant cette période.

Les variations de concentration en sels nutritifs sont plus complexes. On doit, à nouveau, souligner le fait que la méthode d'extraction peut apporter un biais dans l'évaluation de ces concentrations. Par ailleurs, cette extraction n'a été menée que sur une épaisseur relativement peu importante de sédiment. Certains auteurs, tel Duff (1981), mettent en évidence des accumulations d'ammonium à 20-40 cm de profondeur. On peut cependant noter les comportements assez semblables des phosphates et des silicates ainsi que de l'ammonium montrant une accumulation plus ou moins importante en profondeur, et un appauvrissement temporaire dans les strates supérieures; cet appauvrissement correspond de manière assez stricte aux plus fortes concentrations pigmentaires de l'eau interstitielle et du sédiment total. Les nitrites et nitrates évoluent de manière totalement différente vis-à-vis des phosphates et silicates et présentent des accumulations plus importantes en surface du sédiment; les nitrates sont par ailleurs rarement en concentration inférieure à $100 \mu\text{at g.l}^{-1}$.

Quant aux échanges possibles entre l'eau surnageante et le sédiment, certains auteurs tels Vanderborght et Billen (1975), Podamo (1974) ou Stanley *et al.* (1981), appliquent des lois de diffusion aux gradients mesurés ponctuellement dans l'épaisseur du sédiment (loi de Fick; cf. Berner, 1971). D'autres tels Klump et Martens (1981) ou Callender et Hammond (1982) ont employé, en parallèle, des méthodes *in situ* par l'intermédiaire d'enceintes et des calculs de flux à partir des gradients instantanés. Aucune tentative d'évaluation des flux à

l'interface cl de leurs variations saisonnières n'a été entreprise dans cette étude; les données concernent une épaisseur trop faible de sédiment et la fréquence des prélèvements est trop peu élevée. D'autre part, dans un milieu où les courants de marée atteignent $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ il est probable que le phénomène de diffusion n'intervient pas seul; l'abrasion du sédiment de surface doit jouer un rôle prépondérant dans les éventuels départs de sels nutritifs vers l'eau sus-jacente. La présence de fortes turbidités et de frustules de Diatomées benthiques dans ces masses d'eau (Riaux, 1983), véritables marqueurs des remises en suspension, sont en faveur de cette dernière hypothèse.

D'une manière générale, les sels nutritifs existent, dans l'eau extraite du sédiment étudié, en concentrations bien supérieures à celles des eaux sus-jacentes. Il faut rappeler que le point de prélèvements se situe au niveau de mi-marée, qu'il est donc exondé durant une grande partie de la marée et que la salinité de l'eau recouvrante, que ce soit au flot ou au jusant, n'est jamais inférieure à 20 p. 1.000; ces eaux ont des concentrations en sels nutritifs très inférieures à celles des eaux dessalées qui s'écoulent au jusant au fond du chenal du Dourduff. On peut donc en déduire empiriquement que le phénomène de diffusion du sédiment vers l'eau est possible, du moins en été. En hiver, les masses d'eau de cette ria sont plus riches en sels minéraux et un phénomène inverse peut se produire, c'est-à-dire, un piégeage de certains sels nutritifs par le sédiment.

On peut remarquer que les périodes de pauvreté relative en sels nutritifs interstitiels correspondent en grande part aux périodes riches en pigments chlorophylliens dit « actifs », que ce soit dans le sédiment total ou dans l'eau interstitielle. Il est donc apparemment difficile de dissocier la part revenant à l'assimilation par les microphytes de celle due au « relargage ».

Le phénomène d'émersion biquotidienne introduit pour le sédiment étudié, une autre source de variations. Lorsque le sédiment s'assèche à marée basse, l'eau d'imbibition s'écoule vers le chenal principal du Dourduff par des rigoles, sortes de micro-cañons, qui dessinent dans la slikke un réseau complexe de drainage. Ce drainage doit contribuer au renouvellement rapide de l'eau interstitielle et accélérer le processus de dégradation de la manière organique. Le dosage des sels nutritifs au cours de l'émersion dans ces eaux de drainage devrait apporter des éléments de réponse quant au rôle de l'émersion. L'évaporation contribue, par ailleurs, à concentrer les sels nutritifs à la surface du sédiment pendant les périodes d'exondation. Les variations à court terme, en fonction du cycle des marées, seraient donc à approfondir et à réaliser en parallèle avec des mesures de production primaire *in situ*.

Enfin, le rôle joué par la macrofaune n'est pas à négliger, une oxygénation accrue du sédiment durant certaines périodes de l'année pouvant augmenter le taux de minéralisation et accélérer les échanges à l'interface eau-sédiment; les travaux récents de Blackburn et Henriksen (1983) ont ainsi montré que le flux d'ammonium en provenance du sédiment pouvait être augmenté de 50 p. 100 par action de l'endofaune. La présence d'une macrofaune active introduit, de plus, la notion de microdistribution — et de son évolution au cours des

saisons — qu'il serait indispensable d'aborder avec précision pour une meilleure évaluation des paramètres de l'eau interstitielle d'un sédiment.

Remerciements

Je remercie A. Sournia et S. Chamroux pour leur lecture critique du manuscrit; je remercie également les marins de la Station Biologique, J.-L. Birrien pour le dosage d'une partie des sels nutritifs ainsi que T. Bourdon et N. Guyard pour leur aide. Etude réalisée avec le soutien financier du C.X.E.X.O. et du C.N.R.S. - contrat n° 80/6276.

Summary

During 17 consecutive months in 1979-1980, and during one tidal cycle (a summer spring tide), nutrients (NH_4 , NO_2 , NO_3 , SiO_2 , and PO_4), salinity and pigments (chlorophyll *a* and phaeopigments) have been measured in the pore water of an estuarine mud flat.

For some of these parameters a seasonal trend appeared. Salinity and pigments concentrations clearly increased during summer whereas silicate and phosphate decreased. Silicate and phosphate variations are in contrast with those of pigments. Nitrate and nitrite concentrations are always very high (NO_3 reached $1000 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ pore water). Vertical gradients exist in this sediment: nitrate and nitrite are more concentrated in the top layer whereas phosphate and ammonium are higher in the lower layer; on an other hand, these two nutrients are found in higher concentrations in the pore water than in the estuarine overlaying water. The mean N/P ratio is lower in the pore water than in the overlaying water so it can be assessed that phosphate is preferentially accumulating in the sediment.

All these parameters are also fluctuating during the tidal cycle. These short term variations indicated the importance of a precise timing for the sampling.

RÉFÉRENCES

- BAGLINIÈRE, C., CENCIARINI, J., FERNEX, F., PUCCI, R., VAISSIÈRE, R., 1980. — Problems of storage of various substances found in the interstitial waters of the surface sediments of the french continental shelf. *Prog. Wat. Tech.*, 12, pp. 79-87. Pergamon Press Ltd.
- BENDSCHNEIDER, K., ROBINSON, N.J., 1952. — A new spectrophotometric determination of nitrite in sea water. *J. mar. Res.*, 11, pp. 87-96.
- BERNER, R.A., 1971. — Principles of chemical sedimentology, Mc Graw-Hill. (éd.).
- BLACKBURN, T.H., HENRIKSEN, K., 1983. — Nitrogen cycling in different types of sediments from Danish waters. *Limnol. Oceanogr.*, 28, pp. 477-493.
- BOUCHER, G., CHAMROUX, S., RIAUX, C., 1982. — Etude d'impact écologique de la pollution pétrolière de l'« Amoco Cadiz » dans la région de Roscoff et de la Baie de Morlaix — « Effet à long terme sur la structure des écosystèmes sédimentaires ». *Rapport Exécution. Contrat d'études C.N.E.X.O./Paris VI*. N° 80/6276. 42 p. et annexe.
- BOUCHEH, G., CABIOCH, L., CHAMROUX, S., DAUVIN, J.-C., 1983. — Veille écologique des côtes bretonnes — « Etude du macrobenthos, de la méiofaune et des bactéries en Baie de Morlaix ». *Rapport Exécution Contrats d'études C.N.E.X.O./C.N.R.S.* N° 81/6597 et N° 82/2606. 57 pp.
- BOYNTON, W.R., KEMP, W.M., OSBORNE, C.G., 1980. — Nutrient fluxes across the sediment-water interface in the turbid zone of coastal plain estuary. *Estuarine Perspectives*. V. Kennedy (Ed.). Academic Press. N.Y., pp. 93-109.
- BRAY, J.T., BRICKER, O.P., TROUP, B.C., 1973. — Phosphate in interstitial waters on anoxic sediments : oxidation effects during sampling procedures. *Science*, 180, pp. 1362-1364.

- CALLENDER, E., HAMMOND, E., 1982. — Nutrient exchange across the sediment-water interface in the Potomac river estuary. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, 15, pp. 395-413.
- DUFF, L.G., 1981. — The Loch Eil project : effect of organic matter input on interstitial water chemistry of Loch Eil sediments. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, 55, pp. 315-328.
- FISHER, T.R., CARLSON, P.R., BARBER, R.T., 1982. — Sediment nutrient regeneration in three North Carolina estuaries. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, 14, pp. 101-116.
- HARPER, M.A., 1976. — Migration rythm of benthic diatom *Pinnularia viridis* on pond silt. *N.Z. J. mar. Fresh Water Res.*, 10, pp. 381-384.
- HENRIKSEN, K., HANSEN, J.L., BLACKBURN, T.H., 1981. — Rates of nitrification, distribution of nitrifying bacteria, and nitrogen fluxes in different types of sediment from Danish waters. *Mar. Biol.*, 61, pp. 299-304.
- SLUMP, J.V., MARTENS, c.s., 1981. — Biogeochemical cycling in an organic rich coastal marine basin. II. Nutrient sediment-water exchange processes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45, pp. 101-121.
- KOROLEFF, F., 1969. — Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue. *Int. Cons. Explor. Sea. CM.*, 1969/C9, 4 pp.
- KOROLEFF, F., 1970. — Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue. Information on techniques and methods for seawater analysis, *Interlab. Rep. Cons. Int. Explor. mer.*, 3, pp. 19-22.
- MONTGOMERY, JR., ZIMMERMANN, C.V., PRICE, M.T., 1979. — The collection analysis and variation of nutrients in estuarine pore water. *Estuar. Coastal Mar. Sci.*, 9, pp. 203-214.
- MORRIS, A.W., BALE, A.J., HOWLAND, R.J.M., 1982. — Chemical variability in the Tamar estuary, South-West England. *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, 14, pp. 649-661.
- MULLIN, J.B., RILEY, J.P., 1962. — The spectrophotometric determination of silicate-silicon in natural waters with special reference to sea water. *Anal. Chim. Acta*, 12, pp. 162-170.
- MURPHY, J., RILEY, J.P., 1962. — A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, 27, pp. 31-36.
- PODAMO, J., 1974. — Essai de bilan annuel du transfert de l'azote dans le bassin de chasse d'Ostende. III. Recyclage de l'azote dans les sédiments. *Hydrobiol. Bull.*, 8, pp. 67-75.
- MAUX, c., 1977. — Contribution à l'étude de facteurs déterminant l'évolution de la biomasse phytoplanctonique dans l'estuaire de la Penzé (Nord-Finistère). Evolution comparée des phénomènes dans l'eau et les sédiments sous-jacents. *Thèse 3^e cycle. Paris*, 137 p. et annexes.
- RIAUX, C., 1982. — La chlorophylle *a* dans un sédiment estuarien de Bretagne Nord. *Ann. Inst. Océanogr.*, 58, pp. 185-203.
- RIAUX, C., 1983. — Microphytes de l'interface « eau-sédiment » dans une ria de Bretagne Nord : peuplements, biomasse, production, cycle annuel, variabilité à court terme. *Thèse Doc. Sci. Nat. Univ. Paris*, 300 p. et annexe.
- RIAUX-GOBIN, C., 1985. — Sels minéraux et cycles de marées dans un estuaire de Bretagne Nord (Dourduff, France). *Hydrobiologia*, 124, pp. 35-44.
- ROUND, F.E., 1971. — Benthic marine diatoms. *Oceanogr. mar. biol. Ann. lieu.*, 9, pp. 83-139.
- ROUND, F.E., 1979. — A diatom assemblage living below the surface of intertidal sand flats. *Mar. Biol.*, 54, pp. 219-223.
- HOUND, F.E., PALMER, J.D., 1966. — Persistent, vertical migration rythms in benthic micro-flora. Field and laboratory studies on diatoms from the banks of the river Avon. *J. mar. biol. Assoc. U.K.*, 46, pp. 191-214.
- RUTGERS VAN DER LOEFF, M.M., VAN ES, F.B., HELDER, W., DE VRIES, R.T.P., 1981. — Sediment water exchanges of nutrients and oxygen on tidal flats in the Ems. Dollard Estuary. *Netherlands J. Sea Res.*, 15, pp. 113-129.
- STANLEY, S.Q., LEFTLEY, J.W., LIGH'FOOT, A., ROBERTON, N., STANLEY, I.M., VANCE, I., 1981. — The Loch Eil project; sediment chemistry, sedimentation, and the chemistry of the overlying water in Loch Eil. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*, 55, pp. 299-313.
- TREGUER, p., LE CORRE, p., 1975. — Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. Utilisation de l'Auto-Analyseur II Technicon. *LOC, UBO, 2^e édition, Brest*, 100 p.
- VANDEBORGHT, J.P., BILLEN, G., 1975. — Vertical distribution of nitrate concentration in interstitial water of marine sediments with nitrification and denitrification. *Limnol. Oceanogr.*, 20, pp. 953-961.

- WAFAH, M.V.M., 1981. — Nutrients, primary production and dissolved and particulate organic matter in well-mixed temperate coastal waters (Bay of Morlaix — western English Channel) *Thèse 3^e cycle. Paris*, 226 pp.
- WOOD, E.D., ARMSTRONG, F.A.J., RICHARDS, F.A., 1967. — Determination of nitrate in seawater by cadmium-copper reduction to nitrite. *J. mar. Biol. Assoc. U.K.*, 47, pp. 23-31.
- YENTSCH, C.S., MENZEL, D.W., 1963. — A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Res.*, 19, pp. 1221-1231.
- ZEITZSCHEL, B., 1981. — Sediment-water interactions in nutrient dynamics. *Belle. W. Baruch Libr. Mar. Sci.*, 11, pp. 195-218.