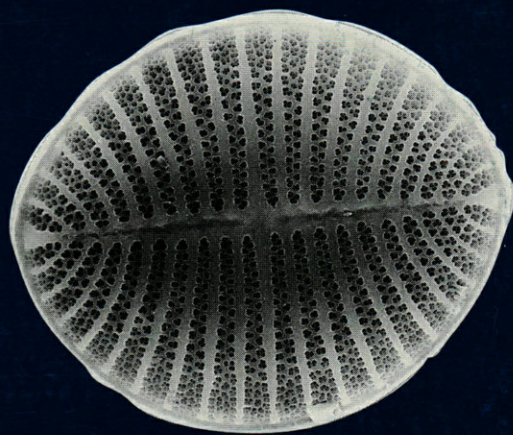


ISSN 0240-8759

Vie et Milieu

Life and Environment

Vol. 45 n° 3/4 – Sept.-Déc. 1995



Périodique d'écologie - Publication trimestrielle

VIE ET MILIEU

Life and Environment

PÉRIODIQUE D'ÉCOLOGIE GÉNÉRALE
JOURNAL OF GENERAL ECOLOGY

LABORATOIRE ARAGO — UNIVERSITÉ P. et M. CURIE

Vie et Milieu - Life and Environment publie des contributions concernant les divers aspects de l'écologie, la biologie et la systématique dans les milieux marins, lagunaires et terrestres :

- biologie et écologie des organismes, des populations et des écosystèmes
- réseaux trophiques, flux énergétiques
- écologie benthique
- pollution
- écologie numérique, modélisation
- évolution et phylogénie

Un numéro à thème paraît chaque année.

La revue est une publication trimestrielle; chaque volume annuel comprend 4 fascicules groupant 400 pages et présente des articles originaux, des communications de synthèse et des notes brèves, en Français ou en Anglais.

Les manuscrits sont reçus par le Professeur A. GUILLE, Directeur de la Publication, ou par M^{me} N. COINEAU, Rédaction (Laboratoire Arago, 66650 Banyuls-sur-Mer, France). Ils ne seront acceptés qu'après avoir été soumis à l'approbation scientifique de deux lecteurs dont les commentaires restent anonymes.

Vie et Milieu - Life and Environment publishes contributions in the fields of Ecology, Biology and Systematics with emphasis on marine, lagoonar and terrestrial milieus :

- Organisms, communities and ecosystems biology and ecology
- Trophic webs, energetics
- Benthic ecology
- Pollution
- Numerical ecology, modelling
- Evolutionary biology and phylogeny

Each year, a single or double issue is devoted to a special topic.

The journal is quarterly. Each volume (four fascicles) of ca 400 pages presents original articles, reviews and short papers, in french or english.

Manuscripts are received by Professor Dr. A. GUILLE, Editor in Chief, or by Dr. N. COINEAU, Executive Editor (Laboratoire Arago, F. 66650 Banyuls-sur-Mer). Papers are only accepted after review by two anonymous referees.

Membres du Comité scientifique international — *International advisory board*

B. BATTAGLIA (Padoue), F. BLANC (Marseille), A. BIANCHI (Marseille), J. BLONDEL (Montpellier), C.F. BOUDOURESQUE (Marseille), P. BOUGIS (Paris), P. CHARDY (Brest), C. COMBES (Perpignan), A. DINET (Banyuls), L. FOULQUIER (Cadarach), R.N. GIBSON (Oban-Argyll), C. HEIP (Gent), R. HESSLER (La Jolla), A. IVANOFF (Paris), G. JACQUES (Banyuls-sur-Mer), W. KÜHNELT (Vienne), R. LABAT (Toulouse), L. LAUBIER (Paris), R. MARGALEF (Barcelone), R.C. NEWELL (Plymouth), J.M. PERÈS (Marseille), J. POCHON (Paris), S. POULET (Roscoff), P. REY (Toulouse).

Publié avec le concours financier du Conseil Général des Pyrénées-Orientales
et de l'Association Naturalia et Biologia

ABONNEMENTS/SUBSCRIPTIONS 1995

Un an (4 numéros) / *Annual subscription (4 issues)*.....
Adresser le paiement à l'ordre de / *Address payment to the order of:*

FRANCE
685 F

AUTRES PAYS
890 F

Vie et Milieu, Laboratoire Arago, 66650 BANYULS-SUR-MER. FRANCE

Les abonnements partent du premier numéro de l'année / *subscriptions begin with the first calendar year*

Numéros séparés de l'année, volumes antérieurs, suppléments et faunes des Pyrénées-Orientales, collections complètes, disponibles / *Back Issues and volumes, supplements and Faunas of Pyrénées-Orientales, complete collections, available:*

VIE ET MILIEU — Laboratoire Arago — F. 66650 BANYULS-SUR-MER

**13^e COLLOQUE
DE L'ASSOCIATION DES DIATOMISTES DE LANGUE FRANÇAISE
27 SEPTEMBRE-1^{er} OCTOBRE 1994, BANYULS/MER – FRANCE**

AVANT-PROPOS – FOREWORD

Chaque année l'Association des Diatomistes de Langue Française (ADLaF)*, qui regroupe de nombreux chercheurs de divers pays, se réunit lors d'un colloque. C'est l'occasion pour tous ceux qui le souhaitent de présenter leurs plus récents travaux et particulièrement pour les jeunes chercheurs leur sujet de Thèse, et d'échanger des informations.

Le 13^e Colloque de l'ADLaF a été accueilli, du 27 septembre au 1^{er} octobre 1994, par le Laboratoire Arago (Observatoire Océanologique) à Banyuls/Mer. Les participants, au nombre d'une quarantaine, représentaient huit nationalités : Allemagne, Belgique, Canada-Québec, Espagne, France, Luxembourg, Royaume-Uni et Suisse. Certains autres chercheurs, particulièrement du Brésil et du Mexique, n'ont malheureusement pas pu participer à ce congrès faute de crédits.

Ce colloque, particulièrement fructueux, a donné lieu à 26 communications (orales et sur Posters) et trois tables rondes. Les divers thèmes abordés lors des communications ont été : « Ecologie des eaux douces », « Comportement », « Ecologie appliquée (réduction des apports anthropiques) et Ecotoxicologie », « Milieux saumâtres et

hypersalins », « Physiologie, Ecologie et Systématique en milieu marin », « Taxinomie », « Paléoclimatologie » et « Utilisation des diatomées ». Les thèmes des tables rondes ont été : « Fragmentation et dissolution des Diatomées », « Typologie des sources », « Croissance en laboratoire et méthodologie ». Un quatrième thème de table ronde a été abordé lors de cette réunion et sera repris et développé lors du 14^e Colloque de l'ADLaF, il s'agit de « La reconnaissance sur le vivant ».

Afin de diffuser largement les travaux exposés lors de ce colloque, les auteurs ont été invités à soumettre leur(s) communication(s), de même que la synthèse des tables rondes, à la revue « *Vie et Milieu* ». 19 publications sont ainsi rassemblées dans ce numéro spécial. Par ailleurs, les résumés – en français et anglais – des communications qui seront publiées *in extenso* dans d'autres revues, sont également joints à la fin de ce fascicule.

Le 14^e Colloque de l'ADLaF, auquel nous souhaitons bon succès, sera organisé du 12 au 15 décembre 1995 par A. Rumeau au Paraclat – Conseil Supérieur de la Pêche – (Ressons-sur-Matz, Amiens, France).

* Le président de l'ADLaF est le Dr Pierre Compère, Jardin Botanique National de Belgique, B-1860 Meise, Belgique.

Catherine Riaux-Gobin
CNRS, URA 117,
Laboratoire Arago, 66650 Banyuls/Mer

LES DIATOMÉES ET LE DIAGNOSTIC DE LA QUALITÉ DES EAUX COURANTES CONTINENTALES : LES PRINCIPALES MÉTHODES INDICIELLES

*Diatoms and the diagnosis of the quality of continental running waters :
the main index-based methods*

J. PRYGIEL* & M. COSTE**

*Agence de l'Eau Artois-Picardie, 764 boulevard Lahure, 59508 Douai Cedex et U.S.T. Lille,
Laboratoire d'Ecologie Numérique, 59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex, France

**CEMAGREF, Groupement de Bordeaux, 50 avenue de Verdun, 33610 Cestas, France

DIATOMÉES
COURS D'EAU
QUALITÉ DES EAUX
INDEX
BIOINDICATEUR

RÉSUMÉ – Depuis la création du système des saprobies en Allemagne au début de ce siècle par Kolkwitz & Marsson, de nombreuses méthodes biologiques pour la mesure de la qualité des eaux courantes ont été mises au point. Directement issues ou simplement dérivées de ce système, ces méthodes sont essentiellement basées sur l'examen de la faune invertébrée. Pourtant, depuis les années 50, des méthodes basées sur l'examen de la flore algale et plus particulièrement diatomique ont été proposées. Ces méthodes ont pour la plupart d'entre elles donné lieu à des indices numériques. Les indices d'origine japonaise ont été testés sans succès en France en raison des nombreuses formes endémiques qu'ils utilisent. Parmi les indices d'origine européenne, l'IPS mis au point par le CEMAGREF apparaît comme le plus performant. Il utilise la totalité des espèces présentes et rend compte de la pollution organique, de l'eutrophisation réelle et potentielle ainsi que de la salinité des eaux. Cet indice est toutefois difficile dans sa mise en œuvre car il nécessite de bonnes connaissances en systématique. C'est pourquoi, un indice de formulation similaire a été proposé voici déjà plus de 10 ans, pour une plus large application par les services gestionnaires de la qualité des eaux. Cet indice s'est révélé perfectible et un indice diatomique pratique a été récemment proposé pour le nord de la France. Celui-ci est basé sur la détermination de 45 genres et 87 espèces. La mise au point d'un indice diatomique pratique national fait actuellement l'objet d'une étude inter-agences. Cette étude devrait déboucher sur la proposition d'une méthodologie complète incluant les techniques d'échantillonnage et de traitement des échantillons, des clés de déterminations appropriées et un logiciel de calcul indiciel. Cet indice sera vraisemblablement basé sur la détermination à l'espèce d'un nombre limité d'espèces considérées comme indicatrices. Un stage de formation à l'utilisation de cet indice est d'ores et déjà programmé dans le cadre des études inter-agences.

DIATOMS
RIVER
WATER QUALITY
INDEX
BIOINDICATOR

SUMMARY – Since the creation of the saprobic system in Germany in the beginning of this century by Kolkwitz & Marsson, a great number of biological methods for the measurement of the quality of running waters has been elaborated. Directly stemming or simply derived from the saprobic system, these methods are essentially based on the study of the invertebrate fauna. However, starting in the 50s, methods were proposed which are based on the study of the algal, and more particularly diatom, flora. The major part of these methods engendered numerical indices. Indices of Japanese origin were tested in France, unsuccessfully because of the numerous endemic forms they use. Among the European indices, the IPS elaborated by CEMAGREF, seems to be the most performing one. It uses all the species present and accounts for organic pollution, real and potential eutrophication as well as water salinity. This index is, however, not easily applied, as it requires high-level knowledge in systematics. This is why an index similar in formula was proposed already 10 years ago, for wider application by the services in charge of the management of water quality. This index proved to be perfectible, and a practical diatom index was recently proposed for the North of France. This index is based on the identification of 45 genera and 87 species. The elaboration of a national practical diatom index is at present underway in the framework of an inter-Agencies

study. This study should result in the proposal of a complete methodology including sampling and sample treatment techniques, appropriate identification keys and index-based calculation software. The index will probably be based on the determination on a species level of a limited quantity of species considered as indicators. A training course for the application of this index is already programmed within the framework of the Inter-Agencies studies.

INTRODUCTION

L'histoire des méthodes biologiques dans l'estimation de la qualité des eaux de surface a débuté il y a plus d'un siècle avec Kolenati (1848) et Cohn (1853) tous deux cités par Liebmann (1962) (De Pauw et Ghetti, 1992). Depuis cette période, de nombreuses méthodes ont été proposées (Hellowell, 1986). La plupart d'entre elles sont basées sur le Système des Saprobies développé par Kolkwitz et Marsson (1902) ou en découlent. A l'origine, le système saprobique était principalement basé sur la présence d'espèces indicatrices microscopiques appartenant aux communautés planctoniques ou périphtiques des cours d'eau lents d'Europe centrale (Fjerdingstad, 1964). Par la suite, ce système a été étendu aux macroinvertébrés, aux macrophytes et aux Poissons. Dans les années 50, le besoin de quantifier cette information biologique complexe est apparu. On est alors passé d'un système purement qualitatif et basé sur la présence-absence de certains taxons à des indices saprobiques (Pantle et Buck, 1955; Zelinka et Marvan, 1961). Dans le même temps, sont apparus les indices biotiques. Ces derniers combinent l'utilisation d'espèces indicatrices et la diversité. C'est à partir du premier d'entre eux, le Trent Biotic Index (Woodiwiss, 1964) qu'ont été mis au point les différents indices biotiques utilisés aujourd'hui en Europe (Newman, 1988). La plupart d'entre eux sont basés sur les macroinvertébrés (Tuffery et Verneaux, 1968; De Pauw et Vanhooren, 1983, Wright *et al.*, 1988). Les algues sont également très utilisées (Blandin, 1986). Mis à part des méthodes basées sur les algues macroscopiques (Dell'Uomo, 1991) et sur les cyanobactéries (Fernandez-Pinas *et al.*, 1991), ce sont les Diatomées qui ont été le plus largement utilisées. Ces dernières sont considérées comme faisant partie des meilleurs bioindicateurs (Schoeman et Haworth, 1986; Round, 1991) et de nombreuses méthodes ont été proposées. Certaines sont basées sur le système saprobique (Slàdeček, 1986a), d'autres sur la connaissance de l'autoécologie des espèces (Van Landingham, 1976), d'autres encore sur la structure des communautés (Patrick, 1949; Van Dam, 1982). Il existe enfin des méthodes basées sur les assemblages écologiques (Lange-Bertalot, 1979; Fabri et Leclercq, 1986; Steinberg et Schiefele, 1988; Schiefele et

Schreiner, 1991) dont certaines ont donné lieu à des indices diatomiques.

LES MÉTHODES INDICIELLES

Les méthodes indicielles basées sur les diatomées peuvent être scindées en plusieurs groupes et sous-groupes (Fig. 1). Certaines de ces méthodes sont basées sur une grille à double entrée. D'autres nécessitent l'utilisation d'une formule. Selon la nature de la formule employée, il est possible de distinguer trois sous-groupes. Dans tous les cas, les techniques d'échantillonnage et de préparation des lames d'observation sont identiques (Prygiel et Coste, 1993a; 1993b).

a. Les grilles indicielles

A partir d'une étude réalisée sur le bassin de la Seine en 1974, Coste et Leynaud proposent un système d'évaluation de la qualité de l'eau basé sur une grille à double entrée comprenant 55 espèces. Horizontalement figurent 4 groupes de 5 espèces relativement euryèces classées dans l'ordre des sensibilités décroissantes. Verticalement, figurent 7 sous-groupes de 5 espèces plus caractéristiques d'un niveau typologique classés par ordre d'apparition le long d'un écosystème théorique amont-aval. Cette grille permet le calcul d'une note variant de 1 à 10 dans le sens des qualités croissantes.

Cette méthode a été reprise par le CEMAGREF en 1984, avec une liste de 110 espèces réparties en 5 groupes et 6 sous-groupes de 10 espèces chacun. Cette méthode a été une nouvelle fois reprise dans le cadre d'un contrat CEE (Descy et Coste, 1990; 1991). Cette dernière grille (Fig. 2) fonctionne selon le même principe et comporte 208 espèces réparties en 8 groupes et 4 sous-groupes. Les inventaires diatomiques sont exprimés en pour mille. Il faut ensuite repérer les espèces figurant dans la grille et en effectuer la somme dans chaque groupe et chaque sous-groupe. La médiane est calculée pour l'ensemble des groupes et des sous-groupes et permet la détermination d'un groupe et d'un sous-groupe médians. L'intersection de ces derniers donne la valeur indicielle. La valeur in-

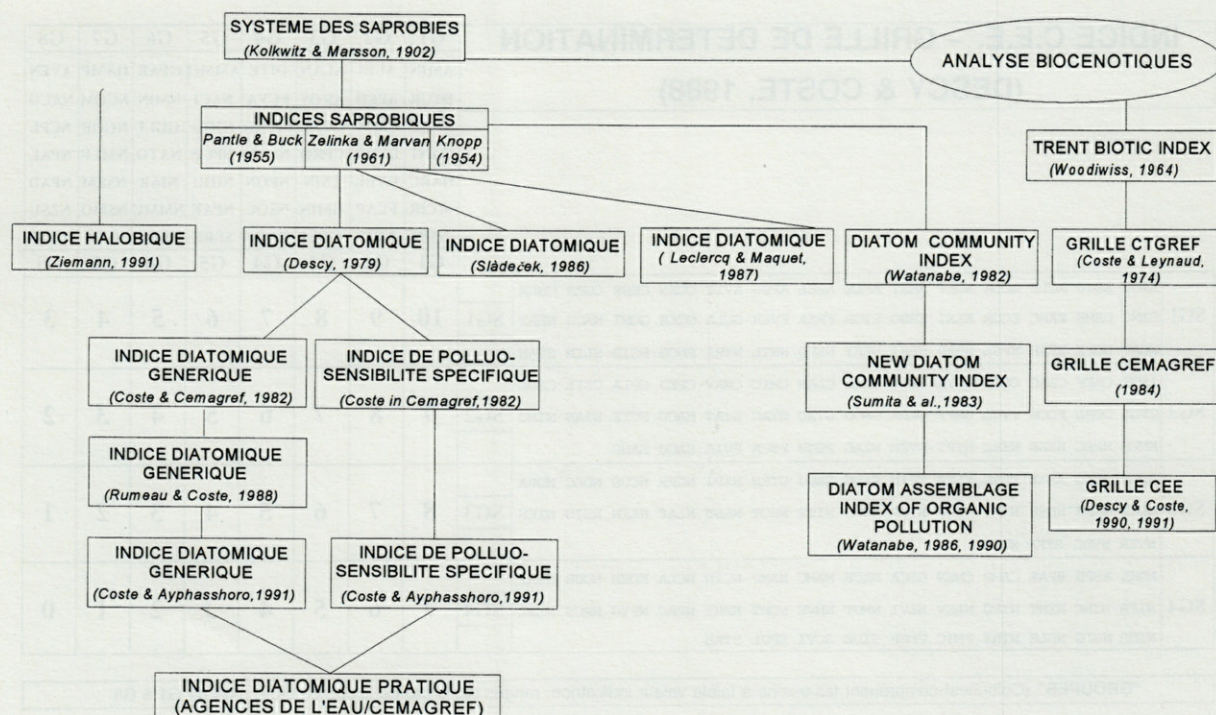


Fig. 1. – Origine des différents types de méthodes d'évaluation de la qualité des eaux continentales courantes basées sur les Diatomées. Les grilles diatomiques dérivent du «Trent Biotic Index» de Woodiwiss (1964). Cet indice qui peut être considéré comme le premier indice biocénotique s'appuie à la fois sur une approche quantitative (prise en compte de la richesse spécifique des communautés) et qualitative (prise en compte d'espèces indicatrices des milieux).

Origin of the various types of continental running water quality evaluation methods based on diatoms. The diatom grids are derived from the Trent Biotic Index of Woodiwiss (1964). The latter, which can be considered as the first ever biocenotic index, rests on an approach which is both quantitative (taking into account the specific richness of the communities) and qualitative (taking into consideration the species which are environment indicators).

dicielle varie de 1 à 20, ce qui facilite les comparaisons avec les autres indices diatomiques ou invertébrés.

b. Les indices diatomiques

Le premier véritable indice diatomique a été proposé par Descy en 1979 à partir d'une étude réalisée dans la partie belge de la Sambre et de la Meuse. Cet indice est basé sur la formule de Zelinka & Marvan (1961) issue du système saprobique : $ID = \sum A_j v_j i_j / \sum A_j v_j$ où A_j est l'abondance relative de l'espèce j , v_j est la valeur indicatrice de l'espèce j ($1 \leq v \leq 3$) et i_j est la sensibilité à la pollution de l'espèce j ($1 \leq i \leq 5$). Pour le calcul de cet indice compris entre 1 et 5, l'auteur propose une liste de 106 espèces et variétés.

Cette méthode a été reprise par Coste (*in Cemagref*, 1982) sous le nom d'Indice de Polluosensibilité Spécifique ou IPS et appliquée avec succès aux rivières du bassin Rhône-Méditerranée-Corse moyennant quelques modifications concernant le mode d'attribution des coefficients de sensibilité à la pollution et de valeur indicatrice, et l'expres-

sion finale des résultats (note comprise entre 1 et 20). Cet indice offre de vastes possibilités dans la mesure où il utilise la totalité des espèces présentes dans les inventaires. Il a d'ailleurs fait l'objet de très nombreuses mises à jour depuis sa création et la dernière version est incluse dans le programme Omnidia (Lecoite *et al.*, 1993) qui permet le calcul informatisé de plusieurs indices.

Cette même méthodologie a été ultérieurement reprise par Sládeček (1986b) et Leclercq et Maquet (1987). Le premier applique cette méthode dans le cadre du système des saprobies. Les valeurs de s (sensibilité à la pollution) et de v (valeur indicatrice) sont attribuées aux différentes espèces en fonction de leur affinité pour la matière organique exprimée par la DBO_5 (Sládeček, 1973 ; 1986b). Les seconds ont appliqué cette méthode sur les cours d'eau ardennais belges. Elle dérive de la méthode de Sládeček mais les auteurs proposent des nouvelles valeurs de s et v après une compilation exhaustive des données autoécologiques de la littérature scientifique.

Il faut enfin, pour terminer, signaler l'existence d'indices diatomiques génériques. Comme les précédents, ces indices reposent sur la formule de Ze-

INDICE C.E.E. – GRILLE DE DETERMINATION (DESCY & COSTE, 1988)		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8						
		AMIN	ALIB	ALAN	DITE	AMMO	GPAP	HAMP	AVEN	DTCR	APED	AROS	FCVA	NACI	NMIN
EPEC	CMIN	CCAE	MVAR	NJOU	GGLI	NGOE	NCPL	GANT	DEHR	CPRO	NLAN	NPUP	NATO	NMLF	NPAL
HARC	DVUL	CSIN	NFON	NIHU	NIAR	NSEM	NPAD	MCIR	FCAP	GMIN	NSOC	NPAE	NMMU	NSMO	NZSU
NSIN	NDIS	GOLI	RABB	SBRE	NSBM	NVEN	NUMB	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
SG1	AAUS ABIO ACLE ACOA ADET AEXI AFLE APOL APUS AVIT CCEB CEHR CGRA CSLE	10	9	8	7	6	5	4	3						
	DANC DHME EARC ECUR EEXI ERHO ETUR FRSA FVIR GCLA GCLE GOMI NACD NBRY														
	NEAF NGPE NEAN NPSL NRAD NREI NRHY NSPD NSTL NTRI PNOB RGIB SLIN STAN														
SG2	ANOR CAFF CBAC CCIS CCYM CELL CHEL CLAN CMIC CNAV CPED CPLA CSIL CSOL	9	8	7	6	5	4	3	2						
	CTGL DOBL FCON FVUL GAFF GGRA GNOD GIRU GYAC GYAT NACU NCTE NLAN NINO														
	NMEN NREC NSBH NSBL NPTT NVER NZAG PGIB PSCA PVIR SACU SANG														
SG3	ACON AEXG ASAX FERF FLEP FPIN GANG GAUG GTER NAPI NCPR NCUS NDEC NDRA	8	7	6	5	4	3	2	1						
	NEXI NGRE NHEU NIFT NIGF NIGR NIRO NITE NKOT NLSU NLAT NLIN NSIO NTEN														
	NVIR NVRO STKR SULN														
SG4	ADEL ASPH BPAR CAMP CMEN GSCA NAUR NAMC NAMP NCIN NCLA NDEB NDUB NHAL	7	6	5	4	3	2	1	0						
	NIFR NINC NINT NIPU NLEV NLVI NMOT NMVE NQBT NPHY NPRO NPYG NRCS NSAL														
	NSHR NSIG NSLE NTRY PMIC PMER SIDE SOVI SPUL STAB														

"GROUPES" (Colonnes) comprenant les taxons à faible valeur indicatrice rangés par ordre de tolérance croissante de G1 à G8

"SOUS-GROUPES" (Lignes) comprenant les taxons à forte valeur indicatrice rangés par ordre de tolérance décroissante de SG1 à SG8

Fig. 2. – Grille diatomique CEE de Coste & Descy (1990). Les groupes horizontaux sont composés d'espèces à large distribution rangées par ordre de tolérance croissante à la pollution. Les sous-groupes sont composés d'espèces à faible amplitude écologique classées par ordre d'apparition le long d'un écosystème théorique amont-aval.

Diatom grid CEE of Coste & Descy (1990). The horizontal groups are made up of widely-distributed species arranged according to increasing pollution tolerance. The sub-groups contain species of low ecological amplitude, listed according to appearance in a theoretical upstream-downstream ecosystem.

linka et Marvan. Les valeurs de s et v sont cette fois attribuées aux genres et non plus aux espèces. Le premier indice a été proposé par Coste (*in* Cema-gref, 1982) à partir de la classification des Diatomées établie par Bourrelly (1981) avec 68 genres. Il répond à un souci de simplification susceptible de donner lieu à des applications plus pratiques. Une méthodologie complète basée sur cet indice et comprenant des clés d'identification a été proposée par Rumeau et Coste en 1988 avec 88 genres et sections retenus. A l'occasion d'une étude menée en 1990 sur le bassin Artois-Picardie (Coste et Ayphassorho, 1991), une troisième version de cet indice générique a été proposée. Cet indice prend en compte de nouveaux genres, en particulier au sein des genres *Navicula* et *Nitzschia* (Round *et al.*, 1990) et utilise désormais un jeu de 308 genres. Il faut cependant noter que 174 genres seulement possèdent des valeurs de s et v. Ces valeurs découlent directement de l'IPS et correspondent aux moyennes des valeurs de s et v des espèces correspondantes.

La plupart des indices diatomiques ont été proposés de façon à rendre compte de la qualité générale des eaux. La sensibilité des Diatomées à

certain paramètres comme le pH ou la minéralisation a cependant conduit certains auteurs à proposer des indices destinés à rendre compte d'un phénomène particulier. Ainsi Ziemann (1991) propose un indice diatomique basé sur le système halobique de Hustedt (1957) :

$$H = [(\Sigma h_H - \Sigma h_X) / \Sigma h] \times 100$$

avec Σh_H = somme des abondances des espèces halobiontes et halophiles (indicatrices de salinité), Σh_X = somme des abondances des espèces halophobes et Σh = somme des abondances de toutes les espèces rencontrées.

Un indice négatif caractérise des eaux avec une teneur faible en sels, plus ou moins acides pour la plupart. Un indice proche de zéro caractérise des eaux douces et un indice supérieur à 10 des eaux avec des teneurs importantes en sels.

Des indices de formulation tout à fait différents ont été développés au Japon. Après avoir effectué des corrélations entre DBO_5 et abondances de Diatomées dans plusieurs rivières japonaises, Watanabe (1982) a proposé deux indices :

$$* DCI \text{ (Diatom Community Index)} = \Sigma T_i + 1/2 \Sigma I_i$$

avec ΣT_i = somme des fréquences relatives des taxons tolérants et ΣI_i = somme des fréquences relatives des taxons indifférents.

* RPIb (River Pollution Index) = $190 - T/1.9$
avec $T = 0.6 B_m + 0.9 A_m + 1.5 B_p + 1.9 A_p$

où B_m = pourcentage de la longueur des portions de secteur bêta-mésosaprobies mesurées graphiquement à la longueur totale de la zone étudiée. A = alpha et p = polysaprobe.

Cet indice permet une appréciation globale de la qualité du cours d'eau et prend une valeur maximale de 100.

Plusieurs variations de cet indice ont été ultérieurement proposées : le NEWDCI ou NDCI (Sumita et Watanabe, 1983), le DAI ou Diatom Assemblage Index (Watanabe *et al.*, 1986) et plus récemment le DAIPo ou Diatom Assemblage Index of organic water pollution (Watanabe, 1990).

MÉTHODES DIATOMIQUES INDICIELLES ET QUALITÉ DES EAUX: SIGNIFICATION DES RÉSULTATS

Certaines méthodes (DAIPo et indices japonais de façon générale) ont été rapidement abandonnées à cause de l'endémisme des espèces de Diatomées (Descy et Coste, 1990; Coste *et al.*, 1991). D'autres (grilles CTGREF et CEMAGREF) ont été abandonnées au profit de méthodes plus récentes et plus performantes. D'autres encore sont très peu utilisées et leur capacité à traduire certains phénomènes n'est pas connue en dehors des zones où ils ont été mis au point (indice halobique de Ziemann).

Les indices basés sur la formule de Zelinka et Marvan demeurent les plus utilisés. Parmi ceux-ci, l'IPS est le plus utilisé et est considéré comme l'indice de référence (Descy et Coste, 1991). Il utilise en effet toutes les espèces rencontrées et a fait l'objet depuis sa création de nombreuses mises à jour pour tenir compte des nouvelles données sur l'écologie des Diatomées et de l'évolution de la taxonomie. A partir d'un logiciel mis au point par le CEMAGREF (Coste, non publié) et dans le cadre d'une étude de la qualité hydrobiologique des cours d'eau du bassin Artois-Picardie (Coste et Ayphassorho, 1991, A.E. Artois-Picardie, 1992), un système d'exploitation des inventaires diatomiques a été développé (Leconte *et al.*, 1993) sous le nom d'Omnia. Ce programme utilise une base de données Omnia 5 (Blyth Software) et fonctionne sous Windows 3 (Microsoft). Il est compatible IBM et Macintosh et permet entre autres le calcul de 6 indices diatomiques (indices de Descy ou DES, 1979), Coste ou IPS (in Cemagref, 1982), Slàdeček ou SLA (1986b), Leclercq et Maquet ou ILM (1987) et in-

dice CEE (Descy et Coste, 1991). Ce logiciel intègre une légère modification apportée par Coste (non publié) au mode de calcul de l'indice CEE. Ce dernier donne en effet une meilleure évaluation de la qualité de l'eau en prenant en compte les groupe et sous-groupe moyens plutôt que médians. L'existence de ces outils informatiques a permis de tester simultanément la réponse de ces indices diatomiques dans différentes conditions.

Un premier test à grande échelle a été réalisé dans le cadre d'un contrat CEE sur 155 stations du Réseau National de Bassin français (RNB) et sur des stations de cours d'eau appartenant à différents pays de la CEE (Descy et Coste, 1990). Parallèlement, une application des indices diatomiques a été réalisée sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse (Descy *et al.*, 1989). Ces deux études montrent que la plupart des indices sont corrélés négativement avec les paramètres indicateurs de la pollution organique (NH_4^+ , DBO_5 , NO_2^-) de l'eutrophisation (PO_4^{3-}) et dans une moindre mesure de la salinité. La relation la plus significative avec le degré de pollution est montrée par les indices suivants : IPS, CEE, ILM, DES tandis que les indices de Slàdeček et de Rumeau et Coste ont une moindre performance. Il faut cependant noter que l'indice générique constitue une méthode relativement facile dans sa mise en œuvre par des utilisateurs ne possédant pas à priori de connaissances approfondies en systématique des Diatomées. On note cependant que les indices diatomiques traduisent mal les pollutions toxiques, en particulier les pollutions métalliques en raison de l'absence de prélèvements purement quantitatifs.

L'étude de la qualité des eaux du bassin Artois-Picardie en 1990 a permis de tester la signification de ces 6 indices diatomiques par rapport à différents jeux de données physico-chimiques (Prygiel et Coste, 1993a; 1993b). Les indices diatomiques traduisent tous de façon satisfaisante la pollution organique qui est le principal facteur de dégradation des eaux de ce bassin. L'IPS est toutefois le seul qui donne une estimation réaliste de la qualité générale des eaux. Il intègre en effet la pollution organique exprimée par la DBO_5 , la DCO ou le NH_4^+ , mais aussi la salinité exprimée par la conductivité et les chlorures, ainsi que l'eutrophisation qu'elle soit réelle et exprimée par la chlorophylle, ou potentielle et exprimée par les phosphates. L'indice générique de Coste et Ayphassorho présente des corrélations moins élevées avec la pollution organique et les paramètres associés que les autres indices même si ces dernières restent hautement significatives. Il répond cependant de façon tout à fait satisfaisante à la salinité et à l'eutrophisation.

La réponse des indices diatomiques du mois de septembre 1990, a été étudiée par rapport à différents jeux de données physico-chimiques corres-

pendant aux mois de septembre, août, juillet et juin 1990, ainsi qu'à différentes physico-chimies moyennes calculées sur ces périodes. Les résultats montrent que les meilleures corrélations entre indices diatomiques et pollution organique sont obtenues pour la physico-chimie simultanée et pour la physico-chimie moyenne correspondant aux 4 mois de la saison estivale. Ceci peut paraître surprenant dans la mesure où les Diatomées ont une durée de vie relativement courte, de l'ordre de quelques heures à quelques jours (Eppley, 1977). Et de fait, si les Diatomées sont particulièrement utiles dans la détection de pollutions de type ponctuel (Eulin *et al.*, 1993), l'intégration sur le long terme a déjà été observée dans d'autres conditions (Leclercq, 1989). Dans le cas du bassin Artois-Picardie, ce phénomène s'explique par la nature même des stations du RNB. Ces dernières ont été choisies de façon à suivre l'évolution de la qualité des eaux sur des périodes relativement longues. Elles sont donc peu soumises aux perturbations très localisées dans le temps et l'espace.

CONCLUSION

Bien que faisant partie des meilleurs bioindicateurs de la qualité des eaux continentales courantes (Round, 1991), et bien que de nombreuses méthodes indicelles ou non aient été proposées, les Diatomées demeurent relativement peu utilisées. Plusieurs critiques ont été apportées aux indices diatomiques (Prygiel et Coste, 1993b) parmi lesquelles les difficultés liées aux connaissances systématiques nécessaires pour leur mise en œuvre et l'absence de standardisation. L'IDG proposé en 1982 par Coste et repris en 1988 et 1991, a marqué une étape importante en proposant aux gestionnaires de la qualité des eaux une méthode pratique et accessible. Les travaux menés dans plusieurs grands bassins hydrographiques montrent d'ailleurs bien l'intérêt de ces derniers pour cette approche. La nécessité de pouvoir suivre régulièrement des réseaux de surveillance nécessite toutefois la mise au point d'une méthodologie complète et standardisée. Différentes approches ont été tentées sur le bassin Artois-Picardie. Après avoir successivement tenté de réduire le nombre d'individus à compter, de baser les indices diatomiques sur les seules espèces dominantes, il apparaît que l'approche la plus satisfaisante pour le gestionnaire est de travailler simultanément au genre et à l'espèce sous réserve que les espèces à identifier soient aisées à reconnaître en microscopie optique (Prygiel et Coste, 1993b). Un nouvel indice diatomique pratique (IDP) a donc été mis au point sur le bassin expérimental de l'Aa à partir de 86 relevés et près de 250 espèces. Dans un premier temps, les inventaires ont été classés

en fonction des écarts observés entre IPS et IDG. Dans un second temps, ont été identifiées les espèces responsables de ces écarts en prenant en compte celles présentant une abondance relative supérieure à 5% et une différence de sensibilité à la pollution avec le genre correspondant supérieure ou égale à 0,4. Plusieurs IDP ont ainsi été mis au point et leurs performances étudiées par rapport à l'IPS.

Tabl. I. – Mise au point d'un Indice Diatomique Pratique (IDP) à partir d'un jeu de 86 inventaires réalisés sur la rivière Aa (nord de la France). Seules les espèces d'abondance supérieure à 5% des inventaires où l'écart IPS-IDG était supérieur ou égal à 1 (IDP3), 2 (IDP2) et 3 (IDP1) ont été prises en compte. La détermination au genre combinée avec des déterminations à l'espèce permet d'obtenir de très bonnes corrélations avec l'IPS (indice de référence) calculé à partir de plus de 200 espèces et variétés différentes.

Elaboration of a Practical Diatom Index (IDP) starting from a set of 86 inventories carried out on the river Aa (in the north of France). Only species with an abundance of 5% of the inventories in which the variation IPS-IDG was equal to or higher than 1 (IDP3), 2 (IDP2) and 3 (IDP1) were taken into account. Identification at the generic level combined with determinations at the species level enables to obtain very good correlations with the IPS (reference index) calculated on the basis of over 200 different species and varieties.

	IPS - IDG	IPS - IDP1	IPS - IDP2	IPS - IDP3
Corrélation	0.801	0.972	0.991	0.994
Nbre espèces à identifier	> 200	27	39	42

Il apparaît que la prise en compte des espèces responsables des écarts supérieurs ou égaux à 2, constitue le meilleur compromis entre fiabilité et applicabilité en réseau. Cette méthodologie a été appliquée aux 480 relevés effectués dans le bassin Artois-Picardie et aux 550 espèces et variétés inventoriées. Il en résulte un indice diatomique pratique Artois-Picardie basé sur la détermination de 45 genres et 87 espèces.

Les inventaires de qualité hydrobiologique sur les cours d'eau français sont actuellement réalisés à partir d'inventaires de la faune macroinvertébrée des cours d'eau. Ces méthodes trouvent toutefois leurs limites en milieu canalisé et en grandes rivières en raison des difficultés d'échantillonnage (Prygiel, 1991). L'intérêt des organismes gestionnaires pour des méthodes alternatives capables d'être appliquées sur tous les types de cours d'eau et de donner des indications sur les niveaux de pollution organique, d'eutrophisation et de minéralisation ont conduit les agences de l'eau et le CEMAGREF à mettre au point un indice diatomique pratique utilisable sur l'ensemble du réseau hydrographique français. Ce travail devrait être achevé début 1996 et sera accompagné d'un stage

de formation à l'attention des services gestionnaires. Il devrait permettre de disposer d'une méthodologie complète comprenant un logiciel de calcul adapté et une clé d'identification des genres et espèces retenus, et de déboucher sur une normalisation. C'est une telle pratique qui a assuré le développement des indices macroinvertébrés.

RÉFÉRENCES

- AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE, 1992. Carte de qualité hydrobiologique de la qualité des cours d'eau du bassin Artois-Picardie, A.E. Artois-Picardie, Douai, 15 p.
- BLANDIN P., 1986. Bioindicateurs et diagnostic des systèmes écologiques. *Bull. Ecol.* **17** (4) : 215-307.
- BOURRELLY P., 1981. Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome II : les algues jaunes et brunes. Chrysophycées, Phéophycées, Xanthophycées et diatomées, Boubée et Cie, Paris, 518 p.
- CEMAGREF, 1982. Etude des méthodes biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. Rapport Q.E. Lyon - Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 218 pages.
- CEMAGREF, 1984. Opération Seine rivière propre. Evaluation de la qualité hydrobiologique : poissons-diatomées. Rapport Agence de l'Eau Seine-Normandie - Conseil Régional Ile-de-France, Paris, 35 p.
- COSTE M. et G. LEYNAUD, 1974. Etude sur la mise au point d'une méthode biologique de détermination de la qualité des eaux en milieu fluvial. Rapport CTGREF AFBSN, Paris, 80 p.
- COSTE M. et H. AYPHASSHORO, 1991. Etude de la qualité des eaux du bassin Artois-Picardie à l'aide des communautés de diatomées benthiques. Application des indices diatomiques. Rapport CEMAGREF Bordeaux-Agence de l'Eau Artois-Picardie, 227 p.
- COSTE M., C. BOSCA et A. DAUTA, 1991. Use of algae for monitoring rivers in France. *In Use of algae for monitoring rivers*, Edited by B.A. Whitton, E. Rott and G. Friedrich, Düsseldorf Germany, E. Rott, Inst. Bot. Univers. Innsbruck : 75-88.
- DELL'UOMO A., 1991. Use of benthic macroalgae for monitoring rivers in Italy. *In Use of algae for monitoring rivers*. Edited by B.A. Whitton, E. Rott and G. Friedrich, Düsseldorf Germany, E. Rott, Institut für Botanik Universität Innsbruck : 129-137.
- DE PAUW N. and G. VANHOOREN, 1983. Method for biological quality assessment of watercourses in Belgium. *Hydrobiologia*. **100** : 153-158.
- DE PAUW N. et P.F. GHETTI, 1992. Biological assessment methods for running water in River water quality; Ecological assessment and control, Edited by P.J. Newman, M.A. Piavaux and R.A. Sweeting, Commission of the European Communities, Bruxelles : 217-248.
- DESCY J.P., 1979. A new approach for water quality estimation using diatoms. *Nova Hedwigia* **64** : 305-323.
- DESCY J.P., M. COSTE et M. MAIFFI-RASSAT, 1989. Application d'un nouvel indice (indice CEE 88) au Réseau National de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, A.E. Rhône-Méditerranée-Corse, Pierre-Bénite, 86 p.
- DESCY J.P. et M. COSTE, 1990. Utilisation des diatomées benthiques pour l'évaluation de la qualité des eaux courantes. Rapport final contrat CEE B-71-23, UNCED-Namur, CEMAGREF Bordeaux, 64 p.
- DESCY J.P. and M. COSTE, 1991. A test of methods for assessing water quality based on diatoms. *Verh. Internat. Limnol.* **24** (4) : 2112-2116.
- EPPLEY R.W., 1977. The growth and culture of diatoms. *In The biology of Diatoms*. Edited by D. Werner, Botanical Monographs 13, Blackwell Scientific Publications : 24-65.
- EULIN A., C. GRUARIN, H. LAVILLE et R. LE COHU, 1993. Evaluation de la qualité de l'eau de la Garonne par référence spéciale aux indices diatomique et chironomidien. *Annls Limnol.* **29** (3-4) : 269-279.
- FABRI R. et L. LECLERCQ, 1986. Végétation de diatomées des rivières du nord de l'Ardenne (Belgique) : Types naturels et impact des pollutions. *In Proc. of the 8th Internat. Diatom Symp.*, Edited by M. Ricard, Paris, August 1984, O. Koeltz Publ. Koenigstein : 337-346.
- FERNANDEZ-PINAS F., F. LEGANES, P. MATEO & I. BONILLA, 1991. Blue-green algae as indicators in water river quality in two Spanish rivers 151-156. *In Use of algae for monitoring rivers*. Edited by B.A. Whitton, E. Rott and G. Friedrich, Düsseldorf Germany, E. Rott, Institut für Botanik Universität Innsbruck : 151-156.
- FJERDINGSTAD E., 1964. Pollution of stream estimated by benthic phytomicro-organisms. I. A saprophy system based on communities of organisms and ecological factors. *Internat. Rev. Hydrobiol.* **49** : 63-131.
- HUSTEDT F., 1957. Die Diatomeenflora des Flusssystemes der Weser im Gebiet der Hansestadt Bremen. *Abh. Naturw. Ver. Bremen.* **34** (3) : 181-440.
- HELLAWELL J.M., 1986. Biological indicators of fresh water pollution and environmental management. Pollution monitoring series, Elsevier Applied Science Publishers, London-New-York, 546 p.
- KOLKWITZ R. & M. MARSSON, 1902. Grundsätze für die biologische Beurteilung des Wassers nach seiner Flora und Fauna. *Mitt. Prüfungsanst. Wasserversorg. Abwasserrein* **1** : 33-72.
- LANGE-BERTALOT H., 1979. Pollution tolerance of diatoms as a criterion for water quality estimation. *Nova Hedwigia.* **64** : 285-304.
- LECOINTE C., M. COSTE and J. PRYGIEL, 1993. «OMNIDIA» a software for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management. *Hydrobiologia.* **269/270** : 509-513.
- LECLERCQ L., 1989. Fiabilité de l'estimation du niveau de pollution organique des eaux courantes par les diatomées et efficacité de leur pouvoir intégrateur. *Cryptogamie-Algol.* **10** (2) : 87-100.
- LECLERCQ L. et B. MAQUET, 1987. Deux nouveaux indices diatomique et de qualité chimique des eaux

- courantes. Comparaison avec différents indices existants. *Cah. Biol. Mar.* **28** : 303-310.
- NEWMAN P.J., 1988. Classification of surface water quality. Review of the schemes used in EC Member States. Heinemann Professional Publishers, Oxford, 189 p.
- PANTLE R. & H. BUCK, 1955. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. *Gas und Wasserfach.* **96** : 604 p.
- PATRICK R., 1949. A proposed biological measure of stream conditions based on a survey of Conestoga basin, Lancaster County, Pennsylvania. *Proc. Acad. Nat. Sci. Philadelphia* **101** : 277-341.
- PRYGIEL J., 1991. Use of benthic diatoms in surveillance of the Artois-Picardie basin hydrobiological quality. In Use of algae for monitoring rivers. Edited by B.A. Whitton, E. Rott and G. Friedrich, Düsseldorf Germany, E. Rott, Institut für Botanik Universität Innsbruck : 89-96.
- PRYGIEL J. and M. COSTE, 1993a. The assessment of water quality in the Artois-Picardie basin (France) by the use of diatom indices. *Hydrobiologia* **269/270** : 343-349.
- PRYGIEL J. and M. COSTE, 1993b. Utilisation des indices diatomiques pour la mesure de la qualité des eaux du bassin Artois-Picardie : bilan et perspectives. *Annls Limnol.* **29** (3-4) : 129-145.
- ROUND F.E., R.M. CRAWFORD & D.G. MANN, 1990. The diatoms. Biology and morphology of genera. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 747 p.
- ROUND F.E., 1991. Diatoms in river water-monitoring studies. *J. Applied Phycol.* **3** : 129-145.
- RUMEAU A. & M. COSTE, 1988. Initiation à la systématique des diatomées d'eau douce. *Bull. Fr. Piscic.* **309** : 1-69.
- SCHIEFELE S. & C. SCHREINER, 1991. Use of diatoms for monitoring nutrient enrichment, acidification and impact of salt in Germany and Austria. In Use of algae for monitoring rivers. Edited by B.A. Whitton, E. Rott and G. Friedrich, Düsseldorf Germany, E. Rott, Inst. für Bot. Univ. Innsbruck : 103-110.
- SCHOEMAN F.R. & E.Y. HAWORTH, 1986. Diatoms as indicators of pollution. Report on a workshop in Proc. 8th Internat. Diatom Symp., Edited by M. Ricard, Paris, August 1984, O. Koeltz Publ. Koenigstein : 157-759.
- SLÀDEČEK W., 1973. System of water quality from the biological point of view. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebnisse Limnol.* **7** : 1-218.
- SLÀDEČEK W., 1986a. Diatoms as indicators of organic pollution. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.* **14** (5) : 555-566.
- SLÀDEČEK W., 1986b. Diatoms as indicators of organic pollution. In Proc. 8th Internat. Diatom Symp., Edited by M. Ricard, Paris, August 1984, O. Koeltz Publ. Koenigstein : 757-758.
- STEINBERG C. and S. SCHIEFELE. Biological indication of trophy and pollution of running waters. *Z. Wasser Abwasser-Forsch.* **21** : 227-234.
- SUMITA M. and T. WATANABE, 1983. New general estimation of river pollution using new diatom community index (NDCI) as biological indicators based on specific composition of epilithic diatom communities applied to Asano-Gawa and Sai-Gawa rivers in Ishikawa prefecture. *Jpn. J. Limnol.* **44** (4) : 329-340.
- TUFFERY G. and J. VERNEAUX, 1968. Méthode de détermination de la qualité biologique des eaux courantes. Exploitation codifiée des inventaires de la faune de fond, Ministère de l'Agriculture (France), CERAFER, section Pêche et Pisciculture : 1-23.
- VAN DAM H., 1982. On the use of measures of structure and diversity in applied diatom ecology. *Nova Hedwigia* **73** : 97-115.
- VAN LANDINGHAM J.W., 1976. Comparative evaluation of water quality in the St Joseph River (Michigan and Indiana, USA) by three methods of algal analysis. *Hydrobiologia* **48** (2) : 145-174.
- WATANABE T., 1982. Numerical assessment of river pollution based on the water quality chart. Research report on Environmental Science, B121-R-12-10, 92-95 (en Japonais).
- WATANABE T., 1990. Numerical simulation of organic pollution in flowing waters. In Encyclopedia of Environmental Control Technology, Vol. 4 : Hazardous waste containment and treatment, Gulf Publishing Company, Houston, Texas : 251-281.
- WATANABE T., K. ASAI and A. HOUKI, 1986. Numerical estimation to organic pollution of flowing water by using the epilithic diatom assemblage - Diatom Assemblage Index (DAIpo). *Sci. Total Environ.* **55** : 209-218.
- WOODIWISS F.S., 1964. The biological system of stream classification used by the Trent River Board. *Chemistry and Industry* **14** : 443-447.
- WRIGHT J.F., P.D. ARMITAGE, M.T. FURSE and D. MOSS, 1988. A new approach to the biological surveillance of river quality using macroinvertebrates. *Verh. Internat. Verein Limnol.* **23** : 1548-1552.
- ZELINKA M. and P. MARVAN, 1961. Zur Präzisierung der biologischen Klassifikation der Reinheit fließender Gewässer. *Arch. Hydrobiol.* **57** : 389-307.
- ZIEMANN H., 1991. Veränderungen der Diatomeenflora des Werra unter dem Einfluss des Salzgehaltes. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.* **19** (2) : 159-174.

Reçu le 15 novembre 1994; received November 15, 1994
 Accté le 30 mai 1995; accepted May 30, 1995

APPLICATION D'INDICES CHIMIQUE ET DIATOMIQUE DE LA QUALITÉ DES EAUX COURANTES UTILISANT LES PEUPELEMENTS DE DIATOMÉES D'UNE STATION D'ÉPURATION PAR LAGUNAGE À MACROPHYTES-MICROPHYTES (Doische, Prov. Namur, Belgique)

*One chemical and one diatomological indices of running water quality
applied to the diatoms communities of a wastewater treatment plant using
reconstructed wetlands
(Doische, prov. Namur, Belgium)*

Louis LECLERCQ

Université de Liège, Station scientifique des Hautes-Fagnes, rue de Botrange, 137, B-4950 Robertville, Belgique

BACILLARIOPHYCEAE
DIATOMÉES
CHIMIE DES EAUX
AUTOÉCOLOGIE
LAGUNAGE
INDICES BIOLOGIQUES
MASSIF ARDENNAIS
BELGIQUE

RÉSUMÉ – Des analyses chimiques et diatomiques ont été réalisées de juin 1989 à août 1990 dans une station d'épuration par lagunage à macrophytes-microphytes. La dynamique de mise en place des processus épuratoires et la mise en charge progressive de la station ont été suivies. Les analyses chimiques ont permis de calculer des rendements saisonniers et des indices de qualité. Les comptages des assemblages de Diatomées ont été exploités par l'analyse floristique, le calcul d'indices diatomiques intégrés, les diagrammes spatiotemporels et la synthèse auto-écologique. Les résultats permettent de discuter l'autoécologie de quelques taxons saprobiontes et saproxènes importants dans les estimations de qualité d'eau. La possibilité d'existence d'écotypes est également évoquée. Enfin, la signification des indices mis au point en rivière et appliqués ici dans des conditions très différentes (charges organiques élevées) est discutée. Pour cette utilisation particulière, une adaptation des diverses méthodes utilisées est nécessaire, afin de faire ressortir l'amélioration réelle de l'effluent.

BACILLARIOPHYCEAE
DIATOMS
WATER CHEMISTRY
AUTOECOLOGY
CONSTRUCTED WETLAND
BIOLOGICAL INDICES
ARDENNE MASSIVE
BELGIUM

ABSTRACT – Chemical and diatomological analyses have been completed from June 1989 to August 1990 in a wastewater treatment plant using reconstructed wetland. The dynamic of the purification process establishment and the progressive loading of the plant were followed. The chemical analyses allowed to calculate seasonal efficiency and indices of quality. Diatoms assemblages were treated by floristic analysis, calculation of integrate indices, spatiotemporal diagrams, auto-ecological synthesis. The results allowed to discuss the autoecology of some saprobiontic and saproxene taxa, important for the water quality estimation. The occurrence of ecotypes was also evoked. The signification of the indices elaborated from rivers and applied here in very different conditions (high organic loading) is discussed. For this use, it's necessary to adjust the different methods to emphasise the real water quality improvement between the influent and the effluent.

1. INTRODUCTION

En 1989, entrant en fonction une station d'épuration par lagunage juxtaposant deux principes : celui de l'épuration par macrophytes utilisant quelques espèces d'hélophytes et celui de l'épuration par microphytes utilisant différents types

d'Algues, ces différents végétaux étant chargés de résorber les nitrates et les phosphates provenant de la minéralisation, par les bactéries, des matières organiques des eaux usées.

Lors de sa conception, ont été réalisées des rivières artificielles reliant les différents bassins, dans le but d'utiliser les Diatomées comme indi-

catrices de qualité d'eau lors du processus épuratoire.

Des analyses d'eau et des prélèvements de Diatomées ont été réalisés pendant les 15 premiers mois de fonctionnement (juin 1989-août 1990). Les résultats sont présentés par l'évolution des paramètres chimiques, les rendements épuratoires, le calcul d'indice de qualité chimique et biologique, l'évolution spatio-temporelle de certains paramètres chimiques et de l'abondance relative de quelques taxons importants de Diatomées, le classement autoécologique des peuplements diatomiques.

2. SENSIBILITÉ DES DIATOMÉES : UN EXEMPLE

Notre étude est limitée aux eaux résiduaires urbaines contenant principalement des matières organiques biodégradables et des matières minérales dissoutes.

Le tableau I montre la réaction d'une rivière (la Joncquière) au rejet direct d'eaux usées. Les valeurs physico-chimiques sont des moyennes annuelles, pour 1987, de prélèvements mensuels ce qui permet de gommer la variabilité horaire, jour-

nalière et hebdomadaire des rejets pollués. Les peuplements de Diatomées sont également décrits par une moyenne annuelle : les pourcentages d'abondance relative sont répartis suivant 5 catégories de taxons de même autoécologie.

En amont du village de Doische, l'eau est légèrement «eutrophiquée» [il est indispensable de distinguer l'eutrophisation (augmentation naturelle du niveau trophique concernant surtout le calcium, le magnésium, les nitrates, le potassium) de l'eutrophication, augmentation des teneurs en phosphates et nitrates d'origine anthropique. Le terme «eutrophication» a été introduit et défini par Duvigneaud (1984)] par l'environnement agricole (lessivage des excréments animaux et des épandages fertilisants). La contamination faible, mais permanente, en phosphore se traduit par la présence, en plus du groupe dominant de taxons d'eau faiblement polluée, des groupes d'eau modérément à très fortement polluée.

La station 2,500 m en aval des rejets du village, se trouve dans la zone polluée : aux teneurs élevées en phosphore et azote minéral et organique correspondent la dominance des espèces très résistantes et résistantes, et la forte diminution des espèces sensibles à ce type d'apport.

Les stations 3, 4 et 5 (2, 3,5 et 4,5 km en aval du village) correspondent à 3 étapes de l'autoé-

Tabl. I. - Assemblages moyens annuels de Diatomées dans 5 stations de la Joncquière et comparaison avec l'état chimique moyen de la rivière (prélèvements de 1987).

Mean annual assemblages of diatoms in 5 stations on the river Joncquière and comparison with the mean chemical state of the river (1987).

	1	2	3	4	5
Ecologie: espèces d'eau					
5. non polluée	0,1	0,3	0,2	0,8	0,2
4. faiblement polluée	<u>74,7</u>	16,1	24,8	23,8	<u>51,2</u>
3. modérément polluée	9,7	10,9	21,1	<u>28,8</u>	22,7
2. fortement polluée	6,7	24,9	<u>33,4</u>	26,7	9,6
1. très fortement polluée	6,0	<u>45,2</u>	13,1	12,2	12,4
Chimie					
orthophosphates (µg-P/l)	35,0	<u>470,0</u>	<u>380,0</u>	<u>325,0</u>	<u>215,0</u>
ammonium (mg-N/l)	0,2	<u>1,7</u>	1,5	0,5	0,2
nitrites (µg-N/l)	4,0	43,0	<u>59,0</u>	<u>58,0</u>	35,0
nitrates (mg-N/l)	0,8	1,7	1,8	2,3	<u>4,0</u>
Etat de la rivière	légèrement eutrophiquée phosphates	polluée P min. et org. N min. et org. C org.	phase d'autoépuration		
			diminution organique,		augmentation minérale
			phosphates nitrites	phosphates nitrites nitrates	eutrophication phosphates nitrates

purification : régression des espèces très résistantes, dominance des espèces résistantes, augmentation des espèces sensibles en présence de teneurs encore élevées en phosphates et nitrites (station 3); codominance des espèces des groupes 2, 3 et 4 en présence de nitrites, d'un peu plus de nitrates et de plus faibles teneurs en phosphates (station 4); dominance des espèces sensibles et modérément sensibles en présence du couple phosphates-nitrates typique de l'eutrophication (station 5).

Ainsi peut-on mettre en évidence la sensibilité des Diatomées aux variations relativement faibles des paramètres chimiques. Ceci démontre que nos connaissances sur l'autoécologie des espèces sont devenues très fiables, notamment grâce à des travaux écologiques récents (Denys, 1991; Fabri & Leclercq, 1984, Krammer & Lange-Berthalot, 1986-1991; Mouthon & Coste, 1984; Pierre, 1969; Slàdeček, 1986; Van Dam *et al.*, 1994; van der Werff & Huls, 1957-1974).

3. NOTION D'INDICES CHIMIQUES ET DIATOMIQUES

Nombreux sont les auteurs qui ont développé ces méthodes, souvent à une échelle régionale plus ou moins vaste (Mouthon & Coste, 1984; Slàdeček, 1986).

Suite à une prospection détaillée de différents affluents de la Meuse belge (Fabri & Leclercq, 1994; Leclercq, 1995, en préparation), aux caractéristiques chimiques variées, naturelles ou polluées, ont été mis au point deux indices chimique et biologique originaux (Leclercq & Maquet, 1987).

L'indice chimique (indice de pollution organique ou IPO) est basé sur les mesures de DBO₅, ammonium, nitrites et phosphates réparties en classes qui ont une signification biologique, c'est-à-dire correspondant à des modifications typiques des peuplements de Diatomées. La répartition en classes, le calcul de l'indice et sa signification sont donnés au tableau II.

Tabl. II. - Méthode de calcul de l'indice de pollution organique (IPO) d'après Leclercq & Maquet (1987). Indice de pollution organique (IPO) = moyenne des numéros de classes des 4 paramètres : 5,0-4,6 : pollution nulle, 4,5-4,0 : pollution faible, 3,9-3,0 : pollution modérée, 2,9-2,0 : pollution forte, 1,9-1,0 : pollution très forte.

Calculation of the organic pollution index (IPO) after Leclercq & Maquet (1987).

	DBO ₅ mg/l-O ₂	NH ₄ ⁺ mg-N/l	NO ₂ ⁻ µg-N/l	o-PO ₄ ³⁻ µg-P/l
classe 5	<2	<0,1	≤5	≤15
classe 4	2-5	0,1-0,09	6-10	16-75
classe 3	5,1-10	1,0-2,4	11-50	76-250
classe 2	10,1-15	2,5-6,0	51-150	251-900
classe 1	>15	>6	>150	>900

L'indice diatomique est dérivé de la méthode de l'index saprobique de Slàdeček (1986):

$$\text{Index saprobique} = \frac{\sum_{x=1}^n A_x \cdot V_x \cdot I_x}{\sum_{x=1}^n A_x \cdot I_x}$$

où n = nombre de taxons du relevé, A = abondance relative (en %) de chaque taxon, V = valence saprobique de chaque taxon, I = valeur indicatrice de chaque taxon.

Le calcul de nouvelles valences et valeurs indicatrices tenant compte des indications autoécologiques de nombreux auteurs et dans des régions variées, permet d'envisager son utilisation sur une plus large échelle géographique. Toute nouvelle donnée de la littérature est encodée et modifie éventuellement la valence ou la valeur indicatrice de l'espèce concernée. 403 taxons ont ainsi reçu des valences saprobiques actualisées (Leclercq, non publié).

Ces deux méthodes ont été appliquées aux prélèvements effectués dans la station d'épuration.

4. PRÉSENTATION DE LA STATION D'ÉPURATION (Fig. 1)

Les eaux usées sont remontées par pompage du collecteur au premier bassin. Celui-ci sert à la décantation et également, à certaines périodes, de réacteur à microphytes. Par gravité, les eaux décantées passent dans 5 bassins mixtes dont la partie amont est plantée d'hélophytes et dont la partie aval est une zone d'eau libre à microphytes.

Les plantations s'étagent comme suit : bassin 1, *Typha latifolia*; bassin 2, *Glyceria aquatica*; bassin 3, *Scirpus lacustris*; bassin 4, *Phragmites communis* et *Epilobium hirsutum*; bassin 5

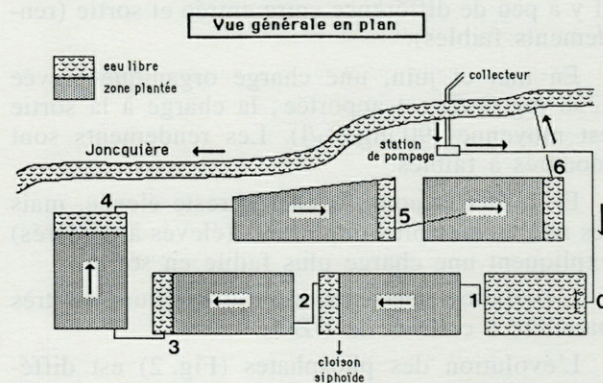


Fig. 1. - Vue en plan de la station d'épuration de Doische et position des stations de prélèvements.

Plan of the wastewater treatment plant of Doische and location of the sample stations.

(composite), *Phalaris arundinacea*, *Iris pseudacorus*, *Carex acutiformis*, *Sparganium erectum*.

Les prélèvements ont été effectués aux entrée et sortie de chaque bassin (numérotées de 0 à 6) : 3 à 15 échantillons d'eau par mois et un prélèvement de Diatomées par mois. La composition chimique est extrêmement variable suivant le moment de la journée, le jour de la semaine et la pluviosité (eaux claires parasites) : c'est pourquoi nous donnons ici les résultats moyens sur les 3 semaines précédant le prélèvement de Diatomées et nous les comparons à un seul échantillon de Diatomées qui ont enregistré ces variations pendant un mois environ.

5. FONCTIONNEMENT DE LA STATION DE JUIN 1989 À AOÛT 1990

Les figures 2 et 3 traitent de l'évolution dans le temps de quelques paramètres caractérisant les eaux usées et des rendements saisonniers. Seules sont prises en compte les stations 0 et 6 (entrée et sortie de la station d'épuration).

Les mesures de la DBO₅ (demande biochimique en oxygène, Fig. 2) font ressortir 4 périodes.

De juin à novembre, on enregistre une faible charge organique en entrée et une très faible charge en sortie : en fait, de juin à octobre, le collecteur n'était pas encore en fonction; la totalité du débit du ruisseau ayant reçu, 500 m plus en amont et de façon dispersée, les effluents du village était injectée. Dans ces conditions, une auto-épuration partielle avait déjà eu lieu ce qui explique les DBO₅ faibles à l'entrée. Les rendements sont très élevés.

De janvier à avril, la station fonctionne normalement par le collecteur et la charge apportée est faible, en raison de la dilution des eaux usées par les eaux claires parasites de la période hivernale. Il y a peu de différence entre entrée et sortie (rendements faibles).

En mai et juin, une charge organique élevée (238 mg-O₂/l) est apportée; la charge à la sortie est moyenne (90 mg-O₂/l). Les rendements sont modérés à faibles.

En juillet et août, la charge reste élevée, mais les rendements plus importants (élevés à modérés) expliquent une charge plus faible en sortie.

L'évolution des teneurs en ammonium est très parallèle à celle de la DBO₅.

L'évolution des phosphates (Fig. 2) est différente. Depuis le début, en juin 1989, 2 à 3 mg-P/l entrent, sauf en période hivernale (janvier à avril) en raison de la dilution. Pour ce paramètre, la station fonctionne donc à sa charge normale depuis sa mise en route. Les valeurs en sortie sont très

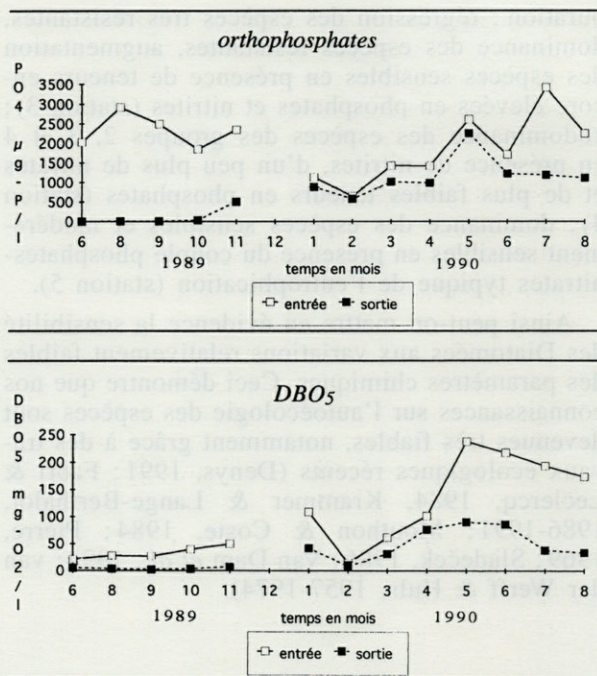


Fig. 2. - Evolution des teneurs moyennes mensuelles en orthophosphates et en DBO₅ de juin 1989 à août 1990, dans l'eau à l'entrée et à la sortie de la station d'épuration.

Evolution of the mean monthly content in orthophosphates and BOD₅ from June 1989 to August 1990, in the influent and effluent water.

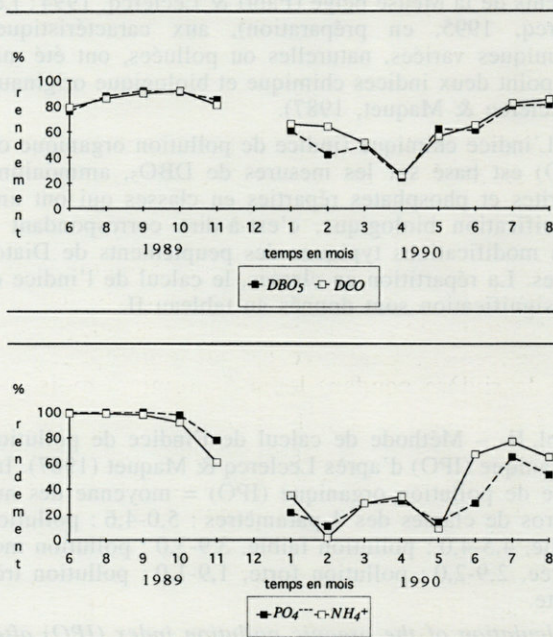


Fig. 3. - Evolution saisonnière des rendements d'épuration sur la DBO₅, la DCO, les orthophosphates et l'ammonium.

Seasonal evolution of the efficiency of the wastewater treatment plant for BOD₅, orthophosphates and ammonium.

révélatrices : de juin à octobre 1989, elles sont proches de 0 (abattement total) ce qui correspond à une phase d'engorgement des sols vierges des différents bassins ; par la suite, elles augmentent progressivement pour atteindre un plafond, de juin à août 1990, aux environs de 1,2 mg-P/l. Cette valeur montre les possibilités réelles d'épuration, en relation directe avec le calcul de dimensionnement.

Les teneurs en nitrites et nitrates en sortie sont classiquement plus élevées en période hivernale (janvier à avril) : la minéralisation de l'azote étant ralentie par les températures basses et les végétaux n'étant plus assez actifs pour résorber les nitrates formés. Cependant, les teneurs en nitrates sont toujours très faibles en sortie (généralement inférieures à 1 mg-N/l).

Logiquement, pour une installation d'épuration basée sur des processus biologiques, les rendements sont plus faibles en hiver et au printemps qu'en été et en automne (Fig. 3). Mis à part les rendements proches de 100 % pendant la période de lancement (juin à octobre 1989), les rendements normaux sur la DBO₅ sont de 40 % en hiver et de 70-80 % en été.

Le lagunage de Doische est en fait une station à charge moyenne, typique des régions rurales où la dilution par les eaux claires parasites est souvent importante par opposition aux stations urbaines à forte charge (DBO₅ de plus de 300 mg-O₂/l). Le tableau III donne la composition chimique typique entrée-sortie pour 4 périodes caractéristiques.

6. ÉVOLUTION FLORISTIQUE DES PEU-LEMENTS DE DIATOMÉES (Tabl. IV)

Les 7 stations prospectées pendant 15 mois après la mise en fonction du lagunage ont livré 106 taxons de Diatomées. Il est évident que l'ensemencement a été favorisé par le pompage direct de la rivière pendant les 4-5 premiers mois.

Le tableau IV cumule les relevés de chaque station : 60 taxons à la station 0, plus riche au début par les apports de la rivière, une diminution jusqu'aux 38 taxons de la station 3, puis une augmentation jusqu'aux 62 taxons de la station 6.

Ce profil est très parallèle à celui de l'oxygène dissous : en effet, depuis la mise en charge normale de la station, on assiste toujours à une diminution progressive de l'oxygène de la station 0 à la station 3 (qui est généralement en anaérobiose), puis une augmentation régulière jusqu'en 6.

Soulignons que les taxons qui disparaissent en amont ne réapparaissent pas tous en aval, mais

Tabl. III. – Composition chimique de l'influent et de l'effluent de la station d'épuration de Doische à 4 périodes caractéristiques et calcul des rendements.

Chemistry of the influent and effluent water of the wastewater treatment plant of Doische for 4 typical periods and efficiency of the plant.

août 1989	entrée	sortie	unités	%
DBO ₅	27,9	3,4	mg-O ₂ /l	87,8
DCO	75	10,8	mg-O ₂ /l	85,6
NH ₄ ⁺	8,5	0,1	mg-N/l	98,8
NO ₂ ⁻	360	7	µg-N/l	98,1
NO ₃ ⁻	0,1	0	mg-N/l	-
PO ₄ ⁻⁻⁻	2925	10	µg-P/l	99,7

janvier 1989	entrée	sortie	unités	%
DBO ₅	109	42,1	mg-O ₂ /l	61,4
DCO	263,1	89,4	mg-O ₂ /l	66,0
NH ₄ ⁺	11,1	7,2	mg-N/l	35,1
NO ₂ ⁻	159	101	µg-N/l	36,5
NO ₃ ⁻	1,9	1,6	mg-N/l	-
PO ₄ ⁻⁻⁻	1140	890	µg-P/l	21,9

mai 1990	entrée	sortie	unités	%
DBO ₅	238,3	90,7	mg-O ₂ /l	61,9
DCO	336	148	mg-O ₂ /l	56,0
NH ₄ ⁺	14,5	13,2	mg-N/l	9,0
NO ₂ ⁻	52	69	µg-N/l	-
NO ₃ ⁻	0	0,1	mg-N/l	-
PO ₄ ⁻⁻⁻	2615	2260	µg-P/l	13,6

août 1990	entrée	sortie	unités	%
DBO ₅	174	33,9	mg-O ₂ /l	80,5
DCO	243	36,5	mg-O ₂ /l	85,0
NH ₄ ⁺	24,1	8,5	mg-N/l	64,7
NO ₂ ⁻	71	59	µg-N/l	16,9
NO ₃ ⁻	0,6	0,2	mg-N/l	-
PO ₄ ⁻⁻⁻	2255	1115	µg-P/l	50,6

sont souvent remplacés par d'autres : c'est notamment le cas pour plusieurs espèces de *Gomphonema*, pour les genres *Caloneis*, *Gyrosigma*, *Neidium*, *Rhoicosphenia* et *Rhopalodia*.

Une simple analyse floristique suffit donc à mettre en évidence cette particularité de fonctionnement et l'amélioration de la qualité depuis l'influent jusqu'à l'effluent. Cependant, l'augmentation de la diversité floristique comme critère de qualité n'a de sens que si l'on reste dans un même niveau trophique, ce qui est le cas ici : ce n'est plus valable si l'on compare des niveaux trophiques très différents (dystrophes, oligotrophes, mésotrophes et eutrophes).

7. ÉVOLUTION DES INDICES CHIMIQUES ET DIATOMIQUES DE JUIN 1989 À MAI 1990

La figure 4 compare, à l'entrée et à la sortie et pendant 15 mois, l'IPO moyen sur 3 semaines

taxons	station n°	0	1	2	3	4	5	6
<i>Achnanthes coarctata</i> (Bréb.) Grun.		+						
<i>A. conspicua</i> Mayer		+						
<i>A. hungarica</i> (Grun.) Grun.				+	+	+		
<i>A. lanceolata</i> (Bréb.) Grun.		+	+	+	+	+	+	
<i>A. lanceolata</i> (Bréb.) Grun. var. <i>rostrata</i> Hust.		+	+	+	+	+	+	
<i>A. minutissima</i> Kütz.		+	+	+	+	+	+	+
<i>Amphora libyca</i> Ehr.								
<i>A. ovalis</i> (Kütz.) Kütz.		+						
<i>A. pediculus</i> (Kütz.) Grun.			+					
<i>Caloneis bacillum</i> (Grun.) Cl.								+
<i>C. molaris</i> (Grun.) Kram.								+
<i>Cocconeis placentula</i> Ehr. var. <i>euglypta</i> Ehr.								+
<i>Craticula accomoda</i> (Hust.) Mann		+	+	+	+	+	+	+
<i>C. cuspidata</i> (Kütz.) Mann								+
<i>C. halophila</i> (Grun.) Mann								+
<i>Cymbella minuta</i> Hilse		+	+					+
<i>C. sinuata</i> Greg.			+					+
<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kütz.		+	+	+	+	+	+	+
<i>C. pseudostelligera</i> Hust.								+
<i>Cymatopleura solea</i> (Bréb.) W. Smith		+						+
<i>Diatoma vulgare</i> Bory					+			
<i>Diploneis oblongella</i> (Naeg.) A. Cl.		+	+					
<i>Eunotia bilunaris</i> Ehr.		+						
<i>E. tenella</i> (Grun.) Hust.		+						
<i>Fragilaria capucina</i> Desm. var. <i>lanceolata</i> Grun.				+	+	+	+	+
<i>F. capucina</i> Desm. var. <i>vaucheriae</i> (Kütz.) Lange-Bert.		+	+	+	+			
<i>Frustulia vulgaris</i> (Thwaites) De Toni								+
<i>Gomphonema acuminatum</i> Ehr.								+
<i>G. angustatum</i> (Kütz.) Rabenh.		+	+	+	+	+	+	+
<i>G. clavatum</i> Ehr.					+	+	+	+
<i>G. olivaceum</i> (Hom.) Bréb.					+	+	+	+
<i>G. parvulum</i> (Kütz.) Kütz.		+	+	+	+	+	+	+
<i>G. truncatum</i> Ehr.					+	+	+	+
<i>Gyrosigma acuminatum</i> (Kütz.) Rabenh.								+
<i>G. scalproides</i> (Rabenh.) Cl.								+
<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun.		+	+					+
<i>Melosira varians</i> Ag.					+	+	+	+
<i>Meridion circulare</i> (Grev.) Ag.		+	+	+	+	+	+	+
<i>M. constrictum</i> Ralfs		+	+					
<i>Navicula atomus</i> (Kütz.) Grun.		+						+
<i>N. atomus</i> (Kütz.) Grun. var. <i>excelsa</i> (Krasske) Lange-Bert.		+	+					
<i>N. atomus</i> (Kütz.) Grun. var. <i>permissis</i> (Krasske) Lange-Bert.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. bacillum</i> Ehr.		+	+					
<i>N. cincta</i> (Ehr.) Ralfs		+	+	+	+			+
<i>N. cohnii</i> (Hilse) Lange-Bert.		+	+					
<i>N. contenta</i> (Grun.)		+						
<i>N. cryptocephala</i> Kütz.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. digitoraduta</i> (Greg.) Ralfs var. <i>minima</i> A. Cl.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. gregaria</i> Donkin		+	+					+
<i>N. ignota</i> Krasske var. <i>palustris</i> (Hust.) J. und.		+						
<i>N. lanceolata</i> (Ag.) Ehr.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. libonensis</i> Schoeman		+						+
<i>N. minima</i> Grun.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. minuscula</i> Grun.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. molestiformis</i> Hust.		+	+	+	+	+	+	+
<i>Navicula mutica</i> Kütz.		+	+					+
<i>N. mutica</i> Kütz. var. <i>ventricosa</i> (Kütz.) Cl. & Grun.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. nivalis</i> Ehr.		+						
<i>N. pupula</i> Kütz.		+						
<i>N. radiosa</i> Kütz.							+	+
<i>N. rhynchocephala</i> Kütz.		+						+
<i>N. saprophila</i> Lange-Bert.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. seminalum</i> Grun.		+						
<i>N. subminuscula</i> Manguin		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. tripunctata</i> (O.F. Müll.) Bory		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. trivialis</i> Lange-Bert.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. veneta</i> Kütz.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. viridula</i> (Kütz.) Ehr.		+						+
<i>Neidium dubium</i> (Ehr.) Cl.							+	+
<i>Nitzschia acicularis</i> (Kütz.) W. Smith		+	+				+	+
<i>N. acula</i> Hantzsch		+						+
<i>N. amphibia</i> Grun.		+			+	+		+
<i>N. archibaldii</i> Lange-Bert.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. capitellata</i> Hust.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. communis</i> Rabenh.		+	+					+
<i>N. constricta</i> (Kütz.) Ralfs		+	+					+
<i>N. debilis</i> (Arnott) Grun.		+	+					+
<i>N. dissipata</i> (Kütz.) Grun.							+	+
<i>N. dubia</i> W. Smith							+	
<i>N. gracilis</i> Hantzsch								+
<i>N. hungarica</i> Grun.		+		+	+	+	+	+
<i>N. inconspicua</i> Grun.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. intermedia</i> Hantzsch							+	+
<i>N. linearis</i> (Ag.) W. Smith							+	+
<i>N. palea</i> (Kütz.) W. Smith		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. pusilla</i> Grun.		+	+	+				+
<i>N. sinuata</i> (Thwaites?) Grun. var. <i>tabellaria</i> (Grun.) Grun.								+
<i>N. sociabilis</i> Hust.								+
<i>N. solita</i> Hust.					+	+		
<i>N. supralittorea</i> Lange-Bert.		+	+	+	+	+	+	+
<i>N. tryblionella</i> Hantzsch								+
<i>N. umbonata</i> (Ehr.) Lange-Bert.			+	+				+
<i>Pinnularia borealis</i> Ehr.		+						
<i>P. brebissonii</i> (Kütz.) Rabenh. var. <i>diminuta</i> (Grun.) Cl.		+	+	+				
<i>P. cuneola</i> Reichardt		+						
<i>P. microstauron</i> (Ehr.) Cl. var. <i>brebissonii</i> (Kütz.) Mayer		+						
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i> (Ag.) Lange-Bert.							+	+
<i>Rhopalodia gibba</i> (Ehr.) J. Müll.							+	+
<i>Staurois anceps</i> Ehr.				+				
<i>S. cf. obtusa</i> Lag. (Lange-Bertalot 1986: pl. 90, fig. 14)		+					+	+
<i>Surirella angusta</i> Kütz.					+	+	+	+
<i>S. brebissonii</i> Kram. & Lange-Bert.								+
var. <i>kuetzingii</i> Kram. & Lange-Bert.		+	+	+	+	+	+	+
<i>S. minuta</i> Bréb.		+						
<i>Synedra acus</i> Kütz.		+		+	+	+	+	+
<i>S. ulna</i> (Nitz.) Ehr.		+	+	+	+	+	+	+
<i>S. ulna</i> (Nitz.) Ehr. var. <i>danica</i> (Kütz.) J.V. II.							+	+
Nombre de taxons		60	47	40	38	46	54	62
Oxygène dissous (en % de saturation)		44	14	22	9	29	46	47

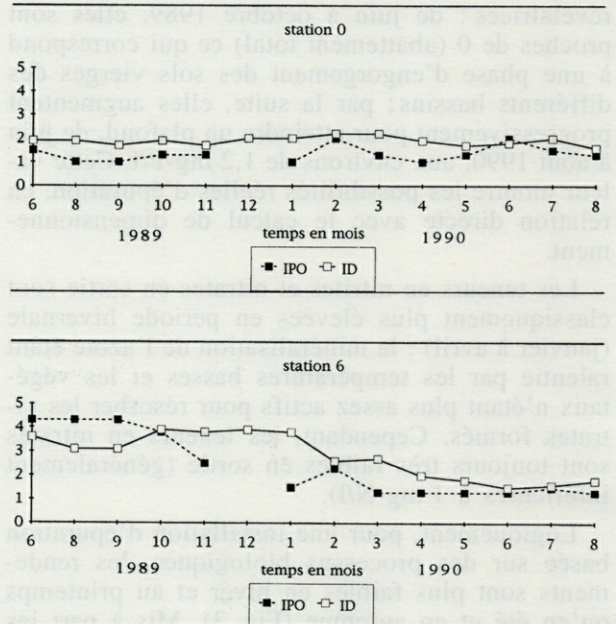


Fig. 4. - Comparaison de l'indice chimique moyen mensuel (IPO) et de l'indice diatomique (ID) dans l'influent (station 0) et l'effluent (station 6).

Comparison between the mean monthly chemical index (IPO) and the diatomic index (ID) in the influent (station 0) and the effluent (station 6) water.

avec l'indice diatomique calculé sur base d'un seul prélèvement. Les valeurs de l'IPO (carrés noirs, traits interrompus) sont très stables à l'entrée (entre 1 et 2 : pollution très forte); elles diminuent progressivement en sortie, parallèlement à l'augmentation de la charge due à l'engorgement de la station : de juin à octobre 1989, l'effluent est de très bonne qualité; puis, de janvier à août 1990, les teneurs en sortie, bien que plus faibles par rapport à celles de l'influent, étaient supérieures à celle de la classe très polluée de l'IPO, ce qui explique que les valeurs indicelles sont aussi basses en sortie qu'en entrée.

L'indice diatomique (ID : carrés blancs, traits continus) évolue très peu dans l'influent. Il reste élevé dans l'effluent 3 mois de plus que l'IPO (nov., déc. et janv.), puis chute, pour rejoindre

Tabl. IV. - Synthèse floristique (Diatomées) dans la station d'épuration de Doische : données cumulées de juin 1989 à août 1990. Dans le bas du tableau, pourcentages de saturation en oxygène dissous (moyenne sur la même période).

Floristic synthesis (diatoms) in the wastewater treatment plant of Doische : cumulative data from June 1989 to August 1990. In the bottom of the table, percentage of saturation in dissolved oxygen (mean for the same period).

l'ID de l'influent à partir d'avril, malgré un rendement de la station de 60 à 80 % sur la DBO₅.

Ces résultats confirment que les limites de la classe très polluée de ce nouvel indice chimique (IPO) a bien une signification biologique : en-dessous, on a un mélange de taxons saproxènes, saprophiles et saprobiontes alors qu'au-dessus, ne subsistent pratiquement plus que des saprobiontes.

D'autre part, l'IPO, mis au point pour des eaux généralement moins chargées de cours d'eau, ne permet pas de mettre en évidence, en station d'épuration, l'amélioration pourtant évidente entre la qualité de l'influent et celle de l'effluent. En effet, étant donné les charges élevées de l'influent, l'effluent est encore assez chargé, même lorsque les rendements sont élevés. Il faudrait donc mettre au point un indice chimique adapté, tenant compte de ces rendements.

L'indice diatomique (ID) suit de près l'IPO moyen. Les Diatomées intègrent donc bien les variations chimiques. C'est particulièrement clair pour la station 6 où l'on passe progressivement d'une pollution faible à une pollution très forte. Il y a néanmoins une période (nov., déc. et janv.) où l'ID est nettement plus élevé que l'IPO : il faudrait donc au moins 3 mois pour que les taxons saproxènes régressent, face aux nouvelles conditions plus saprophiles apparues, brusquement, lors de la mise en service du collecteur. Comme pour la chimie, l'indice diatomique atteint un minimum à la station 6 en phases 3 et 4 malgré un rendement épuratoire de 60 à 80 % ce qui est normal puisque, au niveau du phosphore et de l'azote, on reste dans la classe des eaux très polluées. Il conviendra éventuellement de tester d'autres méthodes tenant compte d'espèces différentielles (Lange-Bertalot, 1978) et de la biodiversité.

8. DIAGRAMMES SPATIO-TEMPORELS

Les indices étant trop synthétiques pour nous permettre de déceler les signes d'une épuration, pourtant bien réelle, entre l'influent et l'effluent, il est nécessaire d'exploiter les résultats de façon plus détaillée. Les diagrammes spatio-temporels sont un essai dans ce sens. Les grilles comptent 7 colonnes pour les stations et 14 lignes pour les campagnes de prélèvement.

8.1. Chimie des eaux (Fig. 5)

Les valeurs des 3 paramètres considérés (DBO₅, ammonium, orthophosphates) ont été réparties en 3 classes de charge qui sont différentes de celles de l'IPO (charge faible, moyenne et forte).

Les 3 diagrammes montrent une évolution parallèle en 4 phases :

— phase 1 de lancement de la station (pompage de la rivière) de juin à sept. : charge moyenne déjà partiellement minéralisée dans le bassin 1 puis faible dans les suivants, rendements excellents (proches de 100 %);

— phase 2 de oct. à févr. : charge moyenne, diluée par les eaux de pluie, mais se propageant progressivement vers les stations aval, marquant ainsi l'engorgement des sols, rendements hivernaux faibles (40 à 60 % sur la DBO₅);

— phase 3 de mars à mai : charge élevée avec un rendement encore hivernal d'où une charge encore élevée en sortie : c'est en fait la phase la plus critique;

— phase 4 de juin à août : charge élevée, rendement estival modéré à élevé, légère amélioration en sortie.

On se reportera au tableau III pour la composition chimique type de ces différentes phases.

8.2. Diatomées (Fig. 6)

Seuls les taxons les plus abondants sont traités et leur valence saprobique est donnée. Dans ce cas, l'abondance relative est répartie en 5 classes symbolisées : plus de 30 % (case noire), de 7 à 30 % (case gris sombre), de 3 à 7 % (case gris clair), de 0,1 à 3 % (case blanche avec un point central), 0 % (case blanche).

Craticula accomoda se développe surtout pendant la phase 3 (charge élevée en période hivernale) : sa valence très faible est ainsi justifiée. Le mois de mai est le plus critique, ce taxon restant abondant dans toutes les stations. Pendant la phase 4, la charge devient tellement élevée que même ce taxon saprobionte est peu représenté dans les stations 0, 1 et 2.

Nitzschia capitellata se développe typiquement en zone de charge modérée (phase 1) et forte (phase 3 dans les stations 0 à 3 et phase 4 partout). Il se comporte donc bien comme saprobionte mais peut aussi se maintenir en charge modérée. Sa valence de 1,5 est correcte.

Nitzschia palea (incl. le *N. palea* «*debilis*»-Sippen de Krammer & Lange-Bertalot, 1988) se localise préférentiellement dans les stations 4, 5 et 6 pendant la phase 3, quand la charge organique est modérée mais les teneurs en ammonium et phosphates encore importantes. Il se développe moins en phase 4 plus chargée aux stations 0 à 3. Un peu moins saprobionte que les deux précédents, ce taxon reçoit donc une valence plus élevée. En remplaçant progressivement *Nitzschia capitellata*, il met en évidence l'amélioration de

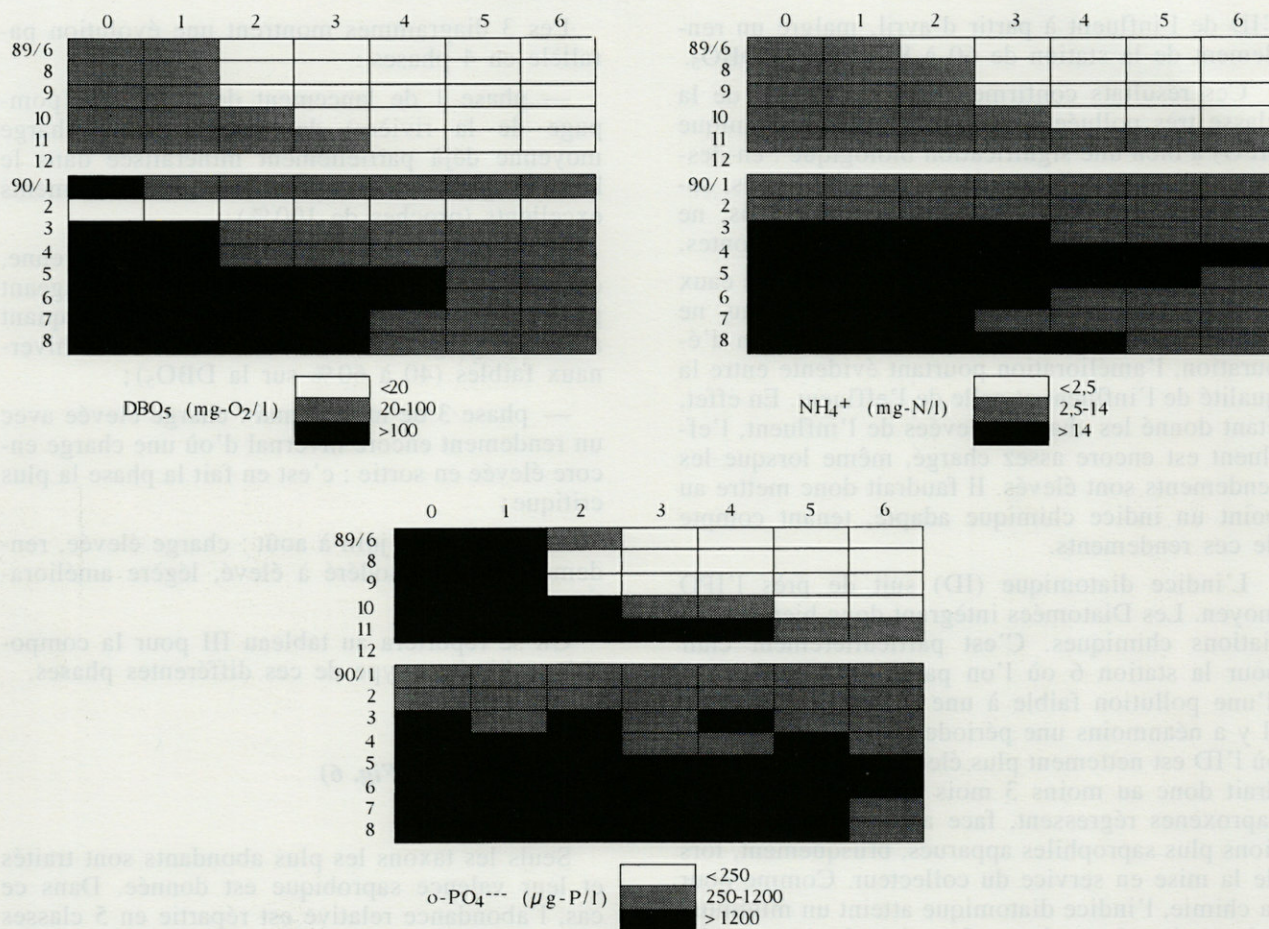


Fig. 5. – Diagrammes spatio-temporels de la composition chimique dans la station de Doische : horizontalement, les stations de prélèvements; verticalement, les analyses moyennes mensuelles. Les résultats sont distribués en 3 classes.

Spatiotemporal diagrams of the chemistry in the wastewater treatment plant of Doische : horizontally, the sample stations; vertically, the mean monthly analysis. The values are distributed in 3 classes.

la qualité de l'effluent que l'indice diatomique ne montrait pas.

Gomphonema parvulum se développe préférentiellement dans les zones de charge modérée à forte, mais déjà fortement minéralisée comme l'indique le parallélisme avec le diagramme spatio-temporel de la DBO_5 . Sa valence de 1,8 semble donc bien trop basse, ce qui est confirmé par de nombreux prélèvements en rivière. Ce taxon assez polymorphe est complexe : en effet, Lange-Bertalot (1993) distingue un *G. parvulum* Kütz. var. *parvulum* f. *saprophilum* Lange-Bert. & Reich. qui serait plus large que le type (6-8 µm contre 5-6,5 µm pour le type : caractère peu évi-

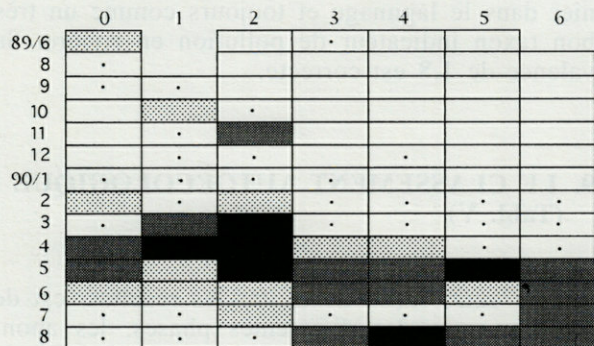
dent) et s'en distinguerait surtout par l'habitat, notamment en station d'épuration. Il pourrait donc s'agir d'un écotype. Il semble cependant que, dans nos échantillons, la forme étroite soit dominante et qu'on puisse l'utiliser pour intégrer l'amélioration de la qualité de l'eau par minéralisation, les teneurs en ammonium et orthophosphates restant élevées. Dans ce cas, la valence saprobique devrait être relevée.

Navicula subminuscula qui, en rivière, est lié à une pollution très forte et qui a déjà été cité en station d'épuration conventionnelle, préfère ici les stations amont de juin 1989 à mars 1990 et les stations aval (4 et 5) d'avril à août 1990. Ces pé-

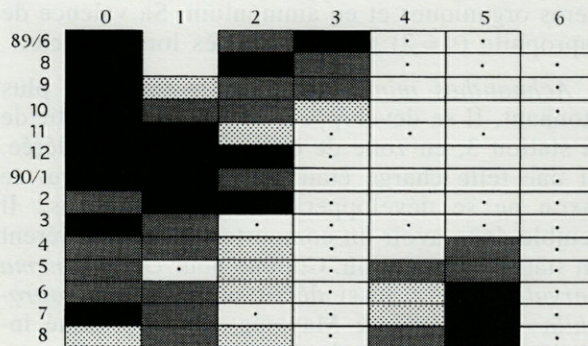
Fig. 6. – Diagrammes spatio-temporels de la composition des assemblages de Diatomées limités aux taxons principaux. Rappel des valences saprobiques (s) des taxons traités. Les pourcentages d'abondance relative sont ramenés à 5 classes.

Spatiotemporal diagrams for the composition of the diatoms assemblages, limited to the principal taxa. Recall of the saprobic value (s) for these taxa. The percentage of relative abundance are distributed in 5 classes.

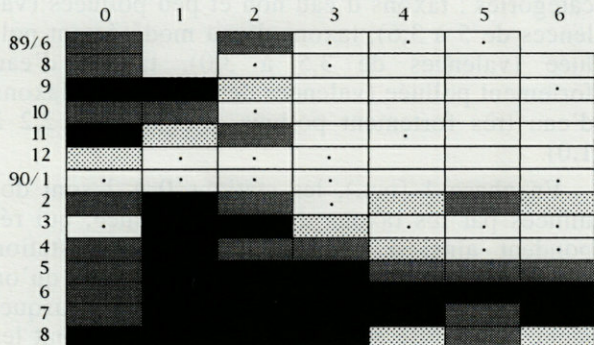
Craticula accomoda (s = 1,3)



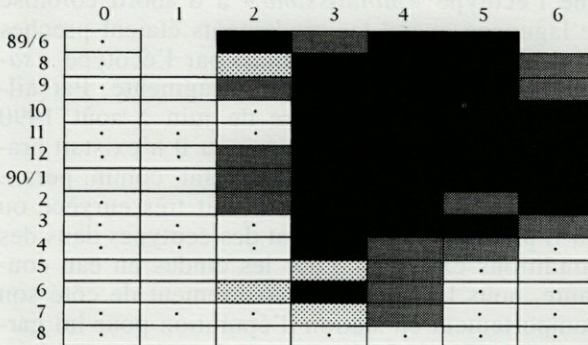
Navicula subminuscula (s = 2,0)



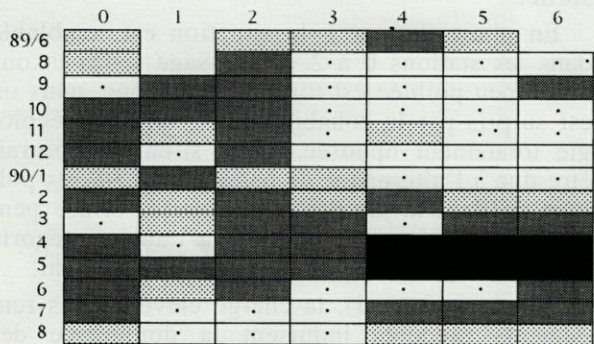
Nitzschia capitellata (s = 1,5)



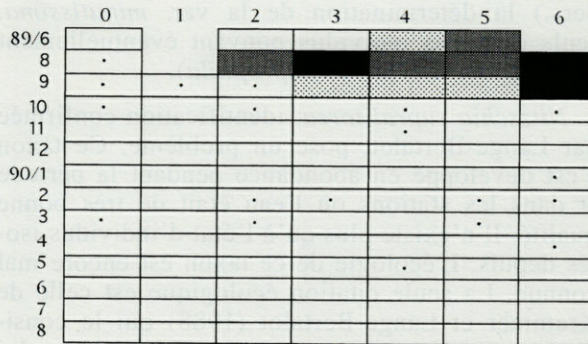
Achnanthes minutissima (s = 4,0)



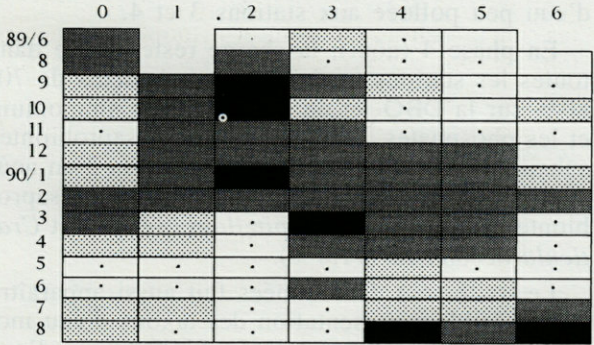
Nitzschia palea (s = 2,0)



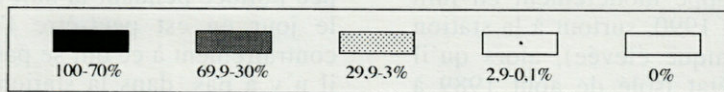
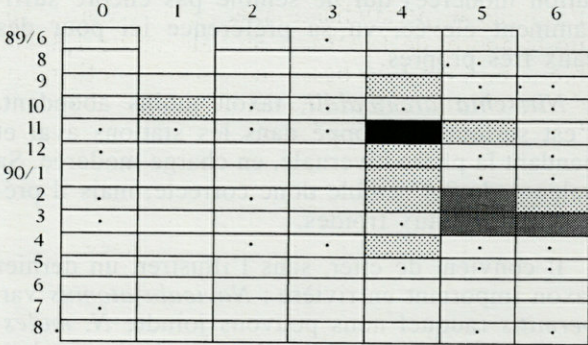
Nitzschia supralitorea (s = 3,0)



Gomphonema parvulum (s = 1,8)



Nitzschia archibaldii (s = 3,4)



riodes correspondent à une charge modérée en matières organiques et en ammonium. Sa valence de saprophile ($s = 2$) nous paraît dès lors correcte.

Achnanthes minutissima est le taxon le plus étonnant. Il se développe brusquement à partir de la station 3, en zone de charge faible à modérée. Si une telle charge était observée en rivière, ce taxon ne se développerait certainement pas ! Il semble donc avoir un comportement très différent en station d'épuration. Comme pour *Gomphonema parvulum*, on a aussi décrit un écotype «saprophila» (Kobayasi & Mayama, 1982) presque indistinguishable morphologiquement de l'écotype «minutissima». Mais alors, il faudrait admettre que l'écotype «minutissima» a d'abord colonisé le lagunage quand les rendements étaient proches de 100 %, puis a été remplacé par l'écotype «saprophila», quand la charge a augmenté. Par ailleurs, il tend à disparaître de juin à août 1990 (charge élevée) et nous savons qu'il n'existait pratiquement plus en 1992 (Iserentant, comm. pers.). Il semble donc que ce taxon soit très euryèce ou qu'il présente effectivement des écotypes dans des conditions extrêmes. Pour les études en eau courante, nous laisserons provisoirement de côté son comportement en station d'épuration pour lui garder une valence de 4, car nous le rencontrons systématiquement dans les cours d'eau de bonne qualité. (Lange-Bertalot nous confirme (comm. pers.) la détermination de la var. *minutissima*, seuls quelques individus pouvant éventuellement être rapportés à la var *saprophila*).

Nitzschia supralitorea, identification confirmée par Lange-Bertalot, pose un problème. Ce taxon s'est développé en abondance pendant la période et dans les stations où l'eau était de très bonne qualité. Il n'existe plus qu'à l'état d'individus isolés depuis. L'écologie de ce taxon est encore mal connue. La seule citation écologique est celle de Krammer et Lange-Bertalot (1988) qui le considèrent comme résistant à la pollution. Nous lui donnons provisoirement une valence de 3,0 (pollution modérée) qui ne semble pas encore suffisamment élevée, vu sa préférence ici pour des eaux très propres.

Nitzschia archibaldii, taxon moins abondant, s'est surtout développé dans les stations aval et pendant la phase hivernale, en charge modérée. Sa valence de 3,4 semble donc correcte, mais il préférerait les eaux froides.

Il convient de citer, sans l'illustrer, un dernier taxon important en rivière : *Navicula atomus* var. *permitis* (auquel nous pouvons joindre *N. molestiformis* et *N. saprophila* d'autoécologie proche). A Doische, il se développe modérément en juin 1989 et de février à juin 1990, surtout à la station 0 (soit en charge organique élevée), alors qu'il n'est plus noté qu'à l'état isolé de août 1989 à janvier 1990 et en juillet-août 1990. Nous le

considérons donc comme un saprobionte saisonnier dans le lagunage et toujours comme un très bon taxon indicateur de pollution en rivière. Sa valence de 1,8 est correcte.

9. LE CLASSEMENT AUTOÉCOLOGIQUE (Tabl. V)

Une autre façon de traiter les résultats est de totaliser, pour les différentes phases, les abondances des taxons de même autoécologie vis-à-vis des polluants organiques. Nous présentons ainsi 4 catégories : taxons d'eau non et peu pollués (valences de 5 à 3,6), taxons d'eau modérément polluée (valences de 3,5 à 3,0), taxons d'eau fortement polluée (valences de 2,9 à 2,3) et taxons d'eau très fortement polluée (valences de 2,2 à 1,0).

En phase 1 (oct.), les stations 0 à 2 sont dominées par les taxons d'eau très polluée, qui répondent ainsi à une charge faible en station d'épuration, mais déjà supérieure à celle qu'on trouve généralement en rivière polluée. Brusquement, à la sortie du bassin à *Glyceria*, ce sont les taxons d'eau peu polluée (principalement *Achnanthes minutissima*) qui dominent jusqu'à la sortie.

En phase 2 (mars), la situation est semblable dans les stations 0 à 2. Le passage à des taxons d'eau peu polluée est tout aussi brusque, mais on est surpris par la cohabitation de taxons d'écologie totalement opposée. Cette situation pourrait être due à l'alternance de passages d'eau très polluée pendant la journée et d'eau très diluée pendant la nuit, favorisant l'une ou l'autre catégorie de taxons qui cohabiteraient alors réellement.

En phase 3 (mai), la charge élevée et les rendements modérés induisent la dominance des taxons d'eau très polluée dans toutes les stations, avec, cependant, une timide poussée des taxons d'eau peu polluée aux stations 3 et 4.

En phase 4 (août), la charge reste élevée dans toutes les stations, malgré des rendements de 70-80 % sur la DBO_5 et de 50-65 % sur l'ammonium et les phosphates. Seules les espèces saprobiontes subsistent. Le cas extrême est la station 3 en août 90 (2 % d'oxygène dissous) avec 99,9 % de saprobiontes dont *Nitzschia capitellata* (87,6 %) et *Cratichia accomoda* (11,6 %).

Le traitement des données fait aussi apparaître la très faible représentation des taxons d'eau modérément et fortement polluée. L'alternance d'eau peu polluée pendant la nuit et très polluée pendant le jour en est peut-être l'explication. De plus, contrairement à ce qui se passe en rivière (Tabl. I), il n'y a pas, dans la station d'épuration, de zone eutrophiquée caractéristique (abondance simulta-

Tabl. V. – Synthèse autoécologique des assemblages de Diatomées de la station d'épuration de Doische pour 4 périodes caractéristiques. Les chiffres sont des pourcentages d'abondance relative. En gras, groupes dominants.

Autoecological synthesis of the diatoms assemblages in the wastewater treatment plant of Doische for 4 typical periods. Results in percentage of relative abundance. In bold, the dominant clusters.

PHASE 1							
OCTOBRE: faible charge déjà minéralisée (pompage à la rivière), rendements très élevés							
taxons d'eau	0	1	2	3	4	5	6
non ou faiblement polluée	0,1	0,1	1,9	82,1	84,8	94,3	90,3
modérément polluée	0,4	4,4	1,1	1,7	1,2	1,8	3,1
fortement polluée	2,3	0,1	0,2	3,3	1,5	0,6	2,8
très fortement polluée	97,2	95,2	96,8	12,9	2,1	3,3	3,8

PHASE 2							
MARS: moyenne charge par dilution hivernale, rendements faibles, production de nitrates							
taxons d'eau	0	1	2	3	4	5	6
non ou faiblement polluée	0,6	1,6	0,2	49,1	70,1	46,7	21,5
modérément polluée	5,8	5,0	1,1	0,6	2,7	9,5	28,8
fortement polluée	29,4	0,7	0,7	0,2	0,5	1,7	10,2
très fortement polluée	63,3	92,7	98,0	50,1	26,9	42,1	39,5

PHASE 3							
MAI: forte charge, rendements faibles							
taxons d'eau	0	1	2	3	4	5	6
non ou faiblement polluée	0,0	0,0	0,0	4,4	18,7	1,3	1,0
modérément polluée	0,7	0,3	0,0	0,0	0,5	0,6	2,2
fortement polluée	0,9	0,8	0,0	0,0	0,5	0,0	0,7
très fortement polluée	98,5	98,9	100,0	95,6	80,4	98,1	96,1

PHASE 4							
AOÛT: forte charge, rendements élevés (DBO5, ammonium) à moyens (o-phosphates)							
taxons d'eau	0	1	2	3	4	5	6
non ou faiblement polluée	0,3	0,1	0,0	0,1	0,6	0,2	0,1
modérément polluée	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,2	1,9
fortement polluée	1,6	0,0	0,1	0,0	0,1	0,6	0,1
très fortement polluée	98,0	99,8	99,9	99,9	99,3	99,0	97,9

née de nitrates et de phosphates) qui favorise le développement des taxons spécialisés. En effet, l'influent et l'effluent sont pratiquement toujours dépourvus de nitrates, sauf pendant la période hivernale (phase 2), précisément lorsque les taxons d'eau modérément polluée étaient mieux représentés.

10. CONCLUSIONS

La complexité des processus biologiques par autoépuration dans une rivière et par épuration forcée dans une station par lagunage rendent les interprétations difficiles.

Il est nécessaire de traiter les résultats des analyses chimiques et diatomiques de différentes fa-

çons pour obtenir, par recoupement, des interprétations valables.

Le simple examen floristique sur base d'un nombre de prélèvements suffisant est très étroitement corrélé au profil d'oxygène dans la station d'épuration et donc, incidemment, à l'état d'oxydation de la matière organique. C'est donc un indicateur précieux.

Le calcul d'indices synthétiques gomme les variations individuelles d'interprétation difficile, mais, par le fait même, entraîne une perte d'information difficilement quantifiable. Cependant nous montrons une bonne corrélation entre les indices chimique et diatomique que nous avons mis au point. Mais, au delà d'une certaine charge polluante, ces indices ne mettent plus en évidence le gain de qualité obtenu par épuration.

Les diagrammes spatiotemporels sont réalisés sur base d'une classification des données mieux

adaptée à des charges polluantes toujours plus élevées en station d'épuration qu'en rivière. Il est alors possible de visualiser la diminution du niveau de pollution dans les cas moins évidents où les charges restent élevées au niveau de l'effluent, malgré un rendement satisfaisant. L'autoécologie de certains taxons est discutée.

Enfin, la globalisation des résultats des comptages de Diatomées suivant leur autoécologie permet de mettre en évidence des modifications très brusques des peuplements, alors que l'évolution chimique se fait apparemment suivant un gradient : seul l'oxygène dissous montre de brusques variations et pourrait jouer un rôle important, même dans des communautés en principe autotrophes.

Par ailleurs, certains peuplements juxtaposent en codominance des taxons d'écologies parfois opposées. Ainsi, les Diatomées répondent par des peuplements composites à la grande variabilité de la chimie de ces eaux usées dont la charge diminue très rapidement en phase nocturne et par dilution.

Le coût élevé des analyses chimiques ne permet jamais de suivre en détail ces modifications. Il convient donc de mettre au point des méthodes particulières, pour évaluer le fonctionnement des stations d'épuration par bioindicateurs, mettant ainsi au service de l'épurateur, les avantages de l'intégration des Diatomées et de coûts réduits de ce type d'analyse. Notre contribution est un premier pas dans cette direction.

REMERCIEMENTS – Nous remercions vivement M. L. Woué, Directeur du Centre Marie-Victorin (Vierves-sur-Viroin, Belgique) chez qui le présent travail a été en partie réalisé, M^{me} Poelaert qui a effectué les analyses chimiques dans ce même centre, l'Inspection générale de l'eau (Ministère de la Région Wallonne) qui a financé le projet et le Professeur R. Schumacker, Directeur de la Station scientifique des Hautes-Fagnes (Université de Liège) pour sa lecture attentive et critique du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- DENYS L., 1991. A check-list of the diatoms in the Holocene deposits of the western Belgian coastal plain with a survey of their apparent ecological requirements. Serv. Géol. Belg., Professional Paper. **246** 41 p. et **247** 92 p.
- DUVIGNEAUD P., 1984. La synthèse écologique. Populations, communautés, écosystèmes, biosphère, noosphère. Doin, Paris, 2^e éd., 380 p., 16 pl. h.t.
- FABRI R. et L. LECLERCQ, 1984. Etude écologique des rivières du nord du massif Ardennais (Belgique) : flore et végétation de diatomées et physico-chimie des eaux. Robertville, Stat. scient. Hautes-Fagnes, **1** : 379 p., 33 pl. h.t. ; **2** : 5 + 329 p., 6 fig. & 4 tabl. h.t. ; **3** : 5 + 201 p., 4 cartes & 9 tabl. h.t.
- KOBAYASI H. et S. MAYAMA, 1982. Most pollution-tolerant diatoms of severally polluted rivers in the vicinity of Tokyo. *Jap. J. Phycol.*, **30** : 188-196.
- KRAMMER K. et H. LANGE-BERTALOT, 1986-1991. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae. **1**. Naviculaceae : 876 p. (1986); **2**. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae : 596 p. (1988); **3**. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae : 576 p. (1991); **4**. Achnantheaceae : 437 p. (1991). G. Fischer Verlag, Stuttgart.
- LANGE-BERTALOT H., 1978. Diatomeen-Differentiatypen anstelle von Leitformen : ein geeigneteres Kriterium der Gewässerbelastung. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* **51**, *Algol. Stud.* **21** : 393-427.
- LANGE-BERTALOT H., 1993. 85 neue Taxa und über 100 weitere neu definierte Taxa ergänzend zur Süßwasserflora von Mitteleuropa. *Bibl. diatomologica* **27**, vol. 2/1-4, 454 p. J. Cramer, Berlin.
- LECLERCQ L., 1995. Inventaire floristique (Diatomées) et qualitatif du réseau hydrographique du parc naturel Viroin-Hermeton (prov. Namur, Belgique). En préparation.
- LECLERCQ L. et B. MAQUET, 1987. Deux nouveaux indices chimique et diatomique de qualité d'eau courante. Application au Samson et à ses affluents. Comparaison avec d'autres indices chimiques, biocénétiques et diatomiques. *Inst. roy. Sc. nat. Belg.*, Documents de travail **38** : 113 p. Bruxelles.
- MOUTHON J. et M. COSTE, 1984. Qualité hydrobiologique de la Loire. Etat de référence du site de Villerest. CEMAGREF Lyon, 110 p.
- PIERRE J.F., 1969. Etude hydrobiologique de la Meurthe. Contribution à l'écologie des populations algales. Univ. Nancy, Coll. Th. Fac. Sc., Sc. natur., 150 p.
- SLÀDEČEK V., 1986. Diatoms as indicators of organic pollution. *Acta hydrochim. hydrobiol.*, Dresden **14** (5) : 555-566.
- VAN DAM H., A. MERTENS & J. SINKELDAM, 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherl. J. Aqua. Ecol.* **28** : 117-133.
- VAN DER WERFF A. et H. HULS, 1957-1974. Diatoméeflora van Nederland. Aflev. 1-9, Abcoude – De Hoef.

Reçu le 17 novembre 1994; received November 17, 1994
 Accepté le 17 février 1995; accepted February 17, 1995

MORPHOGENÈSE ET CROISSANCE DE LA DIATOMÉE MARINE *PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM* EN CULTURES CONTINUES DIALYSANTE ET NON DIALYSANTE

Morphogenesis and growth of the marine diatom Phaeodactylum tricornutum in continuous dialysis and non-dialysis (chemostat) cultures

P. MARSOT* et K. MOUHRI**

*Institut National de la Recherche Scientifique, 310, Allée des Ursulines, Rimouski, Québec, G5L 3A1, Canada

**Département de Biologie, Faculté des Sciences, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc

CULTURES CONTINUES
DIATOMÉE MARINE
MORPHOGENÈSE
CROISSANCE
PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM

RÉSUMÉ – La morphogenèse de *Phaeodactylum tricornutum* (Bohlin) (formation de cellules ovales) est observée après une croissance prolongée (≈ 15 jours) en cultures dialysantes maintenues à fort taux de dilution ($D = 0,7$ et $1,2 \text{ d}^{-1}$) et en culture continue non dialysante en équilibre (chemostat), suite à un apport soudain de nitrate dans le milieu nourricier. Dans les deux cas la morphogenèse survient lorsque la Diatomée est exposée à des concentrations non limitantes en nitrate ($> K_s$). La réponse d'une culture continue en équilibre à des enrichissements successifs du milieu nourricier (PO_4^{3-} , SiO_4^{4-} , FeEDTA et NO_3^-) démontre que le nitrate est le nutriment limitant du milieu naturel (estuaire du Saint-Laurent) pour l'espèce considérée. Les conditions particulières de la culture à dialyse continue, notamment en ce qui a trait aux modes d'approvisionnement des nutriments, dilution et diffusion, permettent d'atteindre, à partir d'un milieu naturel, une très forte productivité algale comparativement à la culture continue non dialysante.

CONTINUOUS CULTURES
MARINE DIATOM
MORPHOGENESIS
GROWTH
PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM

ABSTRACT – Morphogenesis of *Phaeodactylum tricornutum* (Bohlin) (oval-cell formation) were observed after prolonged growth (15 days) in continuous dialysis culture maintained at high dilution rates ($D = 0,7$ to $1,2 \text{ d}^{-1}$). Morphogenesis also occurs in continuous culture at equilibrium (chemostat) after nitrate enrichment. In both culture techniques, the presence of nitrate-sufficient concentrations ($> K_s$) appears to be a contributory factor in oval-cell production. The responses of a N-limited continuous culture to various nutrient enrichments (PO_4^{3-} , SiO_4^{4-} , FeEDTA and NO_3^-) showed that nitrate is the principal growth limiting nutrient of the natural estuarine seawater (St-Lawrence estuary), for this species. The particular growth conditions imposed by continuous dialysis culture, specifically the two mechanisms of nutrient supply, diffusion and dilution, determine a higher biomass productivity compared to non-dialysis continuous culture.

INTRODUCTION

La Diatomée marine *Phaeodactylum tricornutum* (Bohlin) est une espèce abondante dans l'estuaire du Saint-Laurent (Québec). Elle prolifère en juillet et août alors que les concentrations en nutriments sont à leurs plus bas niveaux (Sinclair, 1978). Durant cette période de forte productivité primaire, on a dénombré dans la zone euphotique, jusqu'à 10^6 cellules. L^{-1} . Cette Diatomée pennée se présente sous trois formes bien distinctes : fusiforme, triradiée et ovale. Les cellules fusiformes et triradiées sont dépourvues de gaine siliceuse

(Reimann et Volcani, 1968) et dominant généralement en eau libre, ce qui leur confère un comportement planctonique. Les cellules ovales, plus denses et agglutinantes (Riley, 1943) sont dépourvues de bras et certaines d'entre elles possèdent une valve siliceuse (avec raphé) leur permettant, à l'occasion de se mouvoir sur un substrat solide (Neuville *et al.*, 1971; Iwasa *et al.*, 1972; Borowitzka et Volcani, 1978). Le facteur responsable de la morphogenèse de *P. tricornutum* est encore mal défini. Certains auteurs attribuent à la nature solide du milieu de culture (ex : culture sur agar) la transformation des cellules triradiées et fusiformes en cellules ovales (Duke et Rei-

mann, 1977). Plus récemment, Marsot et Houle (1989) ont observé en culture sur milieu liquide naturel (eau de mer) la formation de cellules ovales lors de conditions de croissance autotrophes prolongées sans toutefois identifier la nature de l'élément déclencheur. Nous présentons dans ce travail une étude de la morphogenèse et de la croissance de *P. tricornutum* en cultures continues dialysante et non dialysante utilisant un milieu naturel. L'emploi de ces modes de culture en équilibre de croissance nous a permis d'identifier le nutriment limitant la croissance de *P. tricornutum* et responsable de sa morphogenèse.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La Diatomée *P. tricornutum* provient de la collection du Woods Hole Oceanographic Inst. Mass. La souche est maintenue en culture de routine axénique sur milieu F/2 (Guillard et Ryther, 1962) jusqu'au moment de son ensemencement en cultures continues. La souche est largement représentée par des cellules triradiées et fusiformes (95 à 98 %). Les cellules ovales comptent moins de 5 % de la population avant l'expérimentation.

Culture continue non dialysante (ND)

La culture continue ND (chemostat) opère en équilibre de croissance tel que déterminé par l'apport constant d'un nutriment limitant. L'état d'équilibre d'une culture continue est caractérisé par une densité cellulaire stable ($\ln X_2/X_1 = 0$) et par un taux de croissance néperien (μ_e) égal au taux de dilution (D), d'où l'équation $\mu_e = \ln(X_2/X_1) / t_2 - t_1 + D$. X_2 et X_1 représentent la densité cellulaire de la culture aux temps t_2 et t_1 respectivement. D, le taux de dilution, est mesuré en divisant le débit journalier du milieu nourricier par le volume de la culture. Le dispositif de culture est constitué d'une nourrice de 10 l, d'une enceinte de croissance contenant 2,5 l de milieu et d'un récipient de récolte (10 l) placé à l'obscurité et à une température avoisinant 0°C. Les récipients sont en polycarbonate et la tubulure en silicone, afin d'éliminer toute trace étrangère de silicate. Le débit du milieu nourricier est réglé par le contrôle d'une pompe péristaltique (Gilson minipuls 2). Un bullage d'air (300 mL.min⁻¹) permet l'aération de la culture et son transfert vers le récipient de récolte. L'homogénéité de la culture est assurée par la révolution d'une barre aimantée. La culture est exposée à une température d'incubation de 15°C et à une densité d'éclairement saturante de 135 $\mu\text{mol photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, durant une photopériode de 16 h/24 h. Les échantillonnages ont lieu à heure fixe soit 5 h après le début de la photopériode. L'eau de l'estuaire utilisée par la culture ND contient 20,3 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, 1,7 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ de PO_4^{3-} et 11,0 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ de SiO_4^{4-} . La teneur en NO_2^- est généralement inférieure à 0,2 $\mu\text{mol.L}^{-1}$. La salinité de l'eau est de 28 ‰. La culture ND et les cultures dialysantes sont réalisées dans des conditions axéniques.

Culture continue dialysante

Le montage et le mode d'opération de la culture continue dialysante sont décrits dans Marsot *et al.* (1991). Essentiellement, le dispositif comprend deux milieux distincts circulant en sens inverse : la culture et le milieu nourricier (eau de l'estuaire) séparés l'un de l'autre par une membrane dialysante (fibres dialysantes). En culture continue dialysante, l'apport des éléments nutritifs est assuré simultanément par la diffusion ou dialyse et par la dilution. Cette dernière est accomplie par l'ultrafiltration de l'eau de mer au travers des membranes. L'utilisation d'une cartouche de fibres creuses non biodégradables (modèle B2-200 Toray Industries Inc., Japan) de 15600 cm² procure au dispositif un rapport surface : volume (Am/V) de 43,3 cm².mL⁻¹. Les teneurs moyennes des nutriments de l'eau de mer utilisées sont de 16,2 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ pour les $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, de 1,4 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ pour les PO_4^{3-} , et de 10,1 $\mu\text{mol.L}^{-1}$ pour les SO_4^{4-} . La salinité varie entre 22 et 26,1 ‰. Les cultures sont exposées à une lumière saturante (135 ou 350 $\mu\text{mol photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

Mesures de la biomasse et des paramètres de croissance

Le dénombrement des cellules est effectué à 5 reprises sur lame à puits de type Palmer-Maloney ou sur l'hématimètre Neubauer. Les valeurs en poids sec de l'Algue sont estimées d'après la méthode de Parsons *et al.* (1961). L'échantillon est recueilli sur filtre en fibres de verre prépesé (Gelman). Les filtres chargés de cellules destinés aux mesures du poids sec sont rincés avec une solution de formiate d'ammonium (2,8 %) et le formate est ensuite éliminé par sublimation (100°C pendant 24 h). Le carbone et l'azote cellulaires sont mesurés sur l'analyseur CHN (Perkin-Elmer 2400) après une lyophilisation de 48 h des échantillons de culture. Les concentrations en $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ en PO_4^{3-} et en SiO_4^{4-} de l'eau de mer et du milieu de culture ont été mesurées à l'aide d'un appareil Technicon Autoanalyzer II selon le protocole décrit par Strickland et Parsons (1972).

RÉSULTATS

L'apparition de cellules ovales survient après 15 j de croissance dans les cultures à dialyse recevant un fort taux de dilution ($D = 0,72$ et $1,20 \text{ d}^{-1}$; Fig. 1). Ces cultures sont caractérisées par une densité cellulaire relativement faible et par une teneur en $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ de leur milieu comparable à celle du milieu extérieur (eau de mer) (Tabl. I). Par contre, lorsque la culture opère à faible taux de dilution ($D = 0,33 \text{ d}^{-1}$), la densité cellulaire s'accroît, de même que l'épuisement des nutriments du milieu de culture, et la proportion de cellules ovales ne dépasse pas 5 % de la population (Fig. 1, Tabl. I).

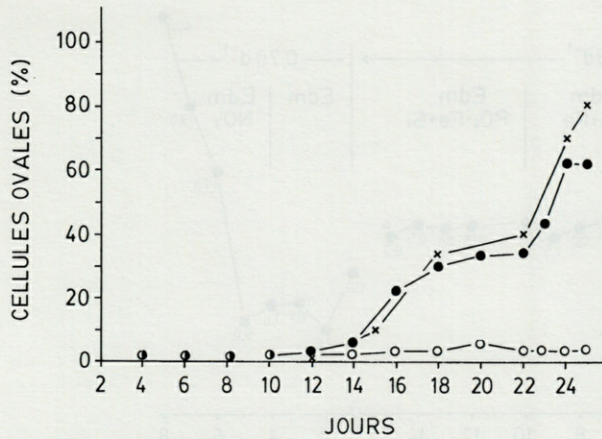


Fig. 1. — Evolution du pourcentage de cellules ovales dans des cultures continues à dialyse de *P. tricornutum* utilisant un milieu naturel. X—X, taux de dilution (D) = 1,20 d^{-1} (éclairage : 350 $\mu\text{mol photon.m}^{-2}.s^{-1}$); O—O, D = 0,33 d^{-1} (éclairage : 350 $\mu\text{mol photon.m}^{-2}.s^{-1}$); ●—●, D = 0,72 d^{-1} (éclairage : 135 $\mu\text{mol photon.m}^{-2}.s^{-1}$).

Changes in percentage of oval cells during continuous growth of *P. tricornutum* in dialysis culture exposed to natural sea-water. X—X, dilution rate (D) = 1,20 d^{-1} (irradiance : 350 $\mu\text{mol photon.m}^{-2}.s^{-1}$); O—O, D = 0,33 d^{-1} (irradiance : 350 $\mu\text{mol photon.m}^{-2}.s^{-1}$); ●—●, D = 0,72 d^{-1} (irradiance : 135 $\mu\text{mol photon.m}^{-2}.s^{-1}$).

La morphogenèse de *P. tricornutum* est ensuite examinée en culture continue ND, aux taux de dilution de 0,23, 0,40 et 0,70 d^{-1} (Fig. 2) correspondant aux densités cellulaires moyennes de 480 000, 370 000 et 250 000 cellules. mL^{-1} (Tabl. I). Nous remarquons que durant ces 3 états d'équilibre (périodes Edm) caractérisés par un épuisement de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ (Tabl. I), les cellules ovales représentent moins de 5 % de la population. L'addition des nutriments majeurs PO_4^{3-} et Fe EDTA et d'oligo-éléments (jour 5, D = 0,4 d^{-1}), aux concentrations du milieu F/2, ne semble pas modifier ni l'équilibre de la culture ni le taux de croissance de l'Algue ($D = \mu_e = 0,4 d^{-1}$) tel qu'indiqué par un niveau de densité cellulaire stable ($\ln X_2/X_1 \approx 0$) du 6^e au 15^e j. De plus, cet apport de nutriments n'a pas d'effet sur la formation de cellules ovales (voir les pourcentages accompagnant la courbe, Fig. 2). L'ajout complémentaire de silicates au jour 10 (D = 0,4 d^{-1}) n'a pas davantage d'influence sur la densité cellulaire de la culture ni sur l'initiation de la morphogenèse. Par contre, l'addition de nitrates (NaNO_3 , 883 $\mu\text{mol.L}^{-1}$) au milieu nourricier (eau de mer non enrichie) se traduit rapidement par une augmentation de cellules ovales et de la biomasse de la culture en équilibre (D = 0,70 d^{-1}) (Fig. 2, Tabl. I). Nous observons également une adhérence des cellules ovales sur les parois de l'enceinte de culture. Cette réaction de *P. tricornutum* n'a pas été quantifiée mais peut conduire à une sous estimation du pourcentage de cellules ovales et de la biomasse produite.

Tabl. I. — Concentration des nutriments $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ et PO_4^{3-} du milieu de cultures continues dialysantes (D) et non dialysante (ND) de *P. tricornutum*. ΔS , différence de concentrations de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ entre le milieu de culture et le milieu nourricier (eau de mer).

Concentration of inorganic nutrients $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ and PO_4^{3-} in continuous culture chambers. D ; continuous dialysis culture; ND, continuous non-dialysis culture; ΔS , difference in ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) concentrations between the inflow sea-water and the culture medium.

Types de culture continue	Taux de dilution (d^{-1})	Densité cell. (10^6 cell. ml^{-1})	Cell. ovales (%)	Nutriments		ΔS
				$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ($\mu\text{mol.L}^{-1}$)	PO_4^{3-} ($\mu\text{mol.L}^{-1}$)	
D*	0,33	22,2	<5,0	<1,0	0,34	>15,0
D	0,72	1,10	4,0 à 63,0	14,2	0,70	1,80
D*	1,20	1,43	4,0 à 82,0	14,4	0,51	1,60
ND	0,23	0,48	1,2	0,41	0,11	-
ND	0,40	0,37	1,3	0,38	0,10	-
ND	0,40	0,36	1,1	0,24	23,5	-
ND	0,40	0,36	0,6	0,21	35,1	-
ND	0,70	0,25	4,7	0,52	2,1	-
ND	0,70	0,60 à 1,0	13,0 à 40,0	612,0	0,08	-

* Cultures exposées à une lumière incidente de 350 $\mu\text{mol photon.m}^{-2}.s^{-1}$. Les autres cultures reçoivent un éclairage de 135 $\mu\text{mol photon.m}^{-2}.s^{-1}$.

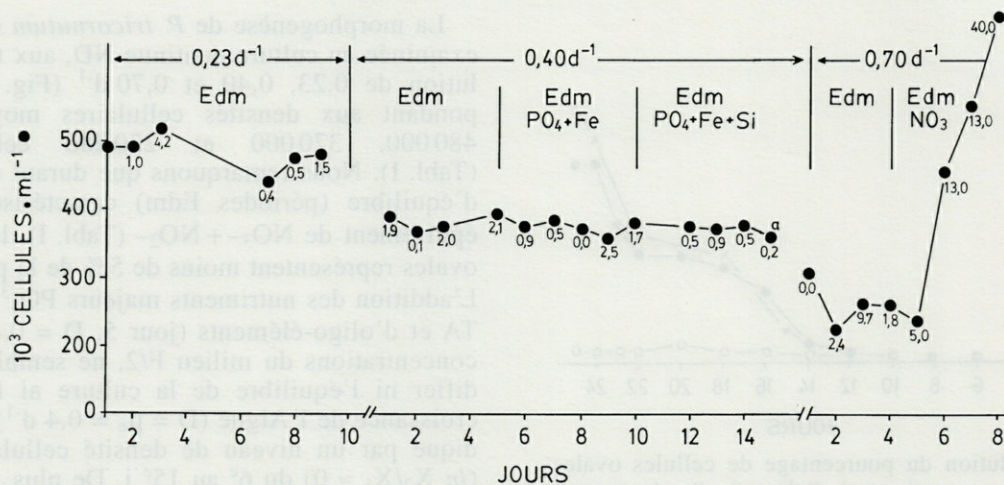


Fig. 2. – Variations de la densité cellulaire et du pourcentage de cellules ovales d'une culture continue non dialysante de *P. tricornutum* en fonction du taux de dilution et de l'ajout d'éléments nutritifs (PO_4 , Fe, Si, NO_3). L'enrichissement en nutriments correspond aux concentrations du milieu F/2 pour les PO_4^{3-} et NO_3^- et 36,0 et 25,0 μ mol.L $^{-1}$ pour les SiO_4^{4-} . Edm, eau de mer non enrichie. Les chiffres accompagnant la courbe indiquent le pourcentage de cellules ovales.

Growth curve and percentage of oval cells of non-dialysis continuous culture of *P. tricornutum* at different dilution rates and nutrient enrichments. PO_4^{3-} and NO_3^- enrichments correspond to F/2 medium concentrations and SiO_4^{4-} to 36,0 and 25,0 μ mol.L $^{-1}$. Edm, non-enriched sea-water. The numbers under the curves refer to percentage of oval cells in the culture.

La cinétique de productivité des cultures continues dialysante et non dialysante se distingue principalement par la relation qui s'établit entre la productivité P et le taux de dilution D. Pour la culture continue ND les valeurs de P varient avec le taux de dilution (Fig. 3A), tandis que pour la culture dialysante, P est en relation inverse avec D pour des valeurs situées entre 0,33 et 1,20 d $^{-1}$ (Fig. 3B, voir aussi Marsot *et al.*, 1991 b).

Les deux méthodes de culture diffèrent également par leur mode d'approvisionnement en nutriments. Ainsi, la culture continue ND montre un taux d'approvisionnement de $NO_3^- + NO_2^-$ (μ mol.L $^{-1}$.d $^{-1}$) qui varie uniquement en fonction du taux de dilution (Fig. 4) alors que la culture dialysante bénéficie d'un apport supplémentaire des nutriments via la diffusion (Fig. 4). Ce dernier varie en fonction de la différence de concentration de $NO_3^- + NO_2^-$ (ΔS) entre le milieu de culture et le milieu extérieur. En admettant qu'en saturation lumineuse ($> 85 \mu$ mol photon.m $^{-2}$.s $^{-1}$) les cultures à dialyse nombreuses utilisent presque complètement leur nitrate (Tabl. I) (Marsot *et al.*, 1992), on peut estimer jusqu'à 3,0 mmol.d $^{-1}$ la quantité de $NO_3^- + NO_2^-$ extraite du milieu naturel par une culture d'un volume (V) d'un litre (Fig. 4). Ces données sont obtenues à partir des valeurs constantes de $P_m = 3,6 \text{ cm.d}^{-1}$ (coefficient de perméabilité du dispositif envers les $NO_3^- + NO_2^-$ Marsot *et al.*, 1992) et de $A_m = 15600 \text{ cm}^2$ et en appliquant l'équation sur la diffusion moléculaire :

ND (transfert de masse) = $P_m.A_m.\Delta S$. Il faut donc noter qu'en culture à dialyse, l'apport par diffusion est plus de 100 fois plus grand que celui obtenu par dilution.

DISCUSSION

Les résultats obtenus en culture continue ND (Fig. 2) semblent confirmer les observations faites en cultures dialysantes (Fig. 1) à l'effet que la formation de cellules ovales est un phénomène naturel relié à un facteur de croissance autotrophe. Il s'agirait en l'occurrence du nitrate qui en concentrations non limitantes dans le milieu d'une culture en croissance active, initierait la morphogénèse. Le phénomène peut être observé après une croissance prolongée (15 j) en cultures dialysantes maintenues à fort taux de dilution (0,72 et 1,2 d $^{-1}$) ou suite à l'introduction soudaine de nitrate à une culture continue ND en état d'équilibre. Les cellules ovales commencent à apparaître ($> 5\%$ de la population) dès la première génération (division/jour = $\mu_c/0,693$) suivant l'ajout de NO_3^- alors que ce morphotype cellulaire ne semble pas proliférer même après plusieurs générations en présence de PO_4^{3-} ou de SiO_4^{4-} (Fig. 2). La morphogénèse se produit lorsque la Diatomée est exposée à des concentrations non limitantes en $NO_3^- + NO_2^-$ (Tabl. I), c'est-à-dire à des concen-

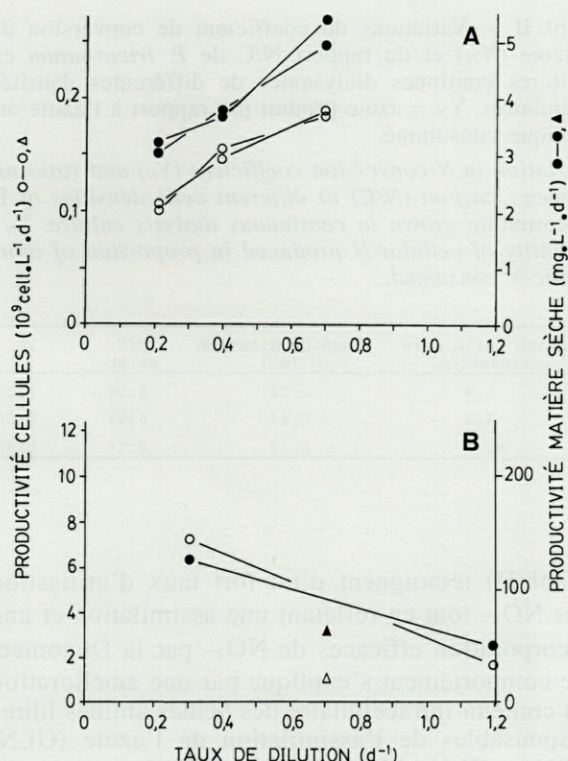


Fig. 3. Productivités de cultures continues non dialysantes (A) et dialysantes (B) de *P. tricornutum* en milieu naturel, en fonction du taux de dilution. Les cultures ND (A) sont exposées à un éclairage de $135 \mu\text{mol photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ de même que la culture dialysante représentée par les symboles Δ et \blacktriangle (B). Les autres cultures dialysantes (B) reçoivent un éclairage de $350 \mu\text{mol photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Algal productivity of continuous non-dialysis (A) and dialysis (B) cultures of *P. tricornutum* in natural seawater as a function of dilution rate. Non-dialysis cultures (A) and dialysis cultures identified by the symbols Δ , \blacktriangle (B) are exposed to an irradiance of $135 \mu\text{mol photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. The other dialysis cultures (B) are exposed to an irradiance of $350 \mu\text{mol photon.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

trations supérieures à la valeur du K_s ($7,0 \mu\text{M}$) relative à l'absorption du NO_3^- (Syrett, 1988). Par ailleurs, la formation de cellules ovales n'est pas initiée tant que la croissance de *P. tricornutum* se poursuit en déficience de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ soit, en opérant une culture à dialyse de forte densité cellulaire (Fig. 1) ou une culture ND dont le taux de croissance est limité par les NO_3^- (Fig. 2). La faible proportion de cellules ovales observée au cours des trois stades de croissance de *P. tricornutum* en milieu non enrichi (Fig. 2) démontre également que l'activité de croissance a peu d'effet sur la morphogénèse contrairement à ce que peut suggérer l'étude de Darley (1968) selon laquelle la durée de génération varie selon le morphotype cellulaire. L'addition des nutriments

PO_4^{3-} et Fe EDTA n'a pas plus d'effet sur l'apparition de cellules ovales que les silicates qui composent la valve silicifiée, exclusive aux cellules ovoïdes de *P. tricornutum* (Lewin *et al.*, 1958; Iwan et Shimizu, 1977; Borowitzka et Volcani, 1978).

Les essais comportant les ajouts successifs d'éléments majeurs (PO_4^{3-} , Fe^{3+} , SiO_4^{4-} , NO_3^-) à une culture continue en équilibre (Fig. 2) nous apprennent que les nitrates constituent le principal élément du milieu naturel limitant la croissance de *P. tricornutum*. Un accroissement de la densité cellulaire est observé deux générations suivant l'ajout de NO_3^- tandis que l'addition des autres éléments PO_4^{3-} et SiO_4^{4-} n'a pas d'effet sur la densité cellulaire de la culture même après plus de deux générations (5,2 générations pour les PO_4^{3-} et 2,9 générations pour les SiO_4^{4-}). L'eau de mer employée pour ces cultures fut prélevée bien avant la floraison phytoplanctonique (février 1994) et contient suffisamment de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ($20 \mu\text{mol.L}^{-1}$). Elle montre un rapport N:P de 12:1, inférieur à ceux observés ailleurs (Goldman *et al.*, 1979), mais possède des caractères trophiques comparables aux autres eaux marines ou estuariennes à savoir : un milieu plus limitant en N qu'en P (Rhee, 1978). Avant de conclure sur la nature du nutriment limitant chez d'autres Diatomées marines, des es-

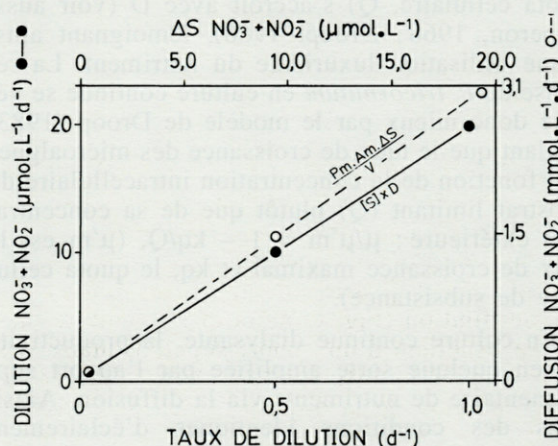


Fig. 4. — Apports des nutriments $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ dans une culture continue à dialyse (dilution \bullet — \bullet et diffusion \circ ----- \circ) et dans une culture continue non dialysante (dilution, \bullet — \bullet) de *P. tricornutum*. ΔS , différence de concentration de nutriments entre le milieu de culture et l'eau de l'estuaire.

Inorganic nutrient ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) supply of a continuous cultures of *P. tricornutum* in dialysis system (dilution \bullet — \bullet plus diffusion \circ ----- \circ) and in a non-dialysis system (dilution \circ ----- \circ). ΔS , difference in nutrient concentration between culture medium and inflow sea-water.

sais complémentaires devront être effectués sur des espèces plus typiques, dotées d'un frustule bien développé par conséquent, plus exigeantes en silice (Nelson *et al.*, 1976).

La culture continue ND peut donner une idée assez juste du potentiel biogène du milieu marin. La grande affinité des microalgues envers les nutriments leur permet de maintenir *in situ* (Goldman *et al.*, 1979), tout comme en culture continue, un taux de croissance élevé malgré l'épuisement des nutriments du milieu. Nos essais montrent que l'eau de l'estuaire peut supporter un taux de croissance de *P. tricornutum* variant entre 0,23 et 0,70 d⁻¹ ou 0,33, à 1,01 division/jour malgré les concentrations résiduelles en NO₃⁻ + NO₂⁻ inférieures à 0,5 µmol.L⁻¹ (Tabl. I). L'épuisement des NO₃⁻ + NO₂⁻ qui se produit à tous les taux de dilution détermine en culture ND une productivité proportionnelle à D (Fig. 3A) : une relation qui *a priori* s'explique par la théorie de Monod (1942, 1950) pour les cultures de bactéries, selon laquelle le taux d'accroissement de la biomasse (dX/dt) est en proportion constante avec le taux d'utilisation du substrat (-Y ds/dt) d'où l'équation :

$$dX/dt = - Y ds/dt,$$

(Y est le coefficient de conversion du substrat (s) en biomasse et t, le temps). Toutefois, la baisse de la densité cellulaire enregistrée avec la hausse de D (Fig. 2) indique que le coefficient Y varie et que le contenu cellulaire en NO₃⁻ + NO₂⁻ (ou quota cellulaire, Q) s'accroît avec D (voir aussi Caperon, 1968; Droop, 1968), témoignant ainsi d'une utilisation luxuriante du nutriment. La réponse de *P. tricornutum* en culture continue se vérifie donc mieux par le modèle de Droop (1983) voulant que le taux de croissance des microalgues soit fonction de la concentration intracellulaire du substrat limitant (Q) plutôt que de sa concentration extérieure : $\mu/\mu'm = 1 - kq/Q$, ($\mu'm$ est le taux de croissance maximal et kq, le quota cellulaire de subsistance).

En culture continue dialysante, la productivité est en quelque sorte amplifiée par l'apport supplémentaire de nutriments via la diffusion. Ainsi, dans des conditions identiques d'éclairement (135 µmol photon.m⁻².s⁻¹) et de taux de dilution (0,72 d⁻¹), la productivité journalière en cellules et en matière sèche (M.S.) d'une culture à dialyse peut être de 10 à 50 fois plus élevée qu'en culture ND (Fig. 3). L'apport par diffusion est beaucoup plus important que celui par dilution (Fig. 4) et, de ce fait, détermine une relation inverse entre P et D (Fig. 3). En cultures denses, le fort taux d'utilisation des nutriments azotés (Tabl. I, Marsot *et al.*, 1992) contribue à l'établissement des gradients de concentration (ΔS) et à la diffusion des molécules nutritives (Fig. 4). Les valeurs élevées de Y_N dans la culture à dialyse nombreuse

Tabl. II. - Variations du coefficient de conversion de l'azote (Y_N) et du rapport N/C de *P. tricornutum* en cultures continues dialysantes de différentes densités cellulaires. Y_N = azote produit par rapport à l'azote organique consommé.

Variation in N-conversion coefficient (Y_N) and ratio nitrogen : carbon (N/C) at different cells densities of *P. tricornutum* grown in continuous dialysis culture. Y_N : quantity of cellular-N produced in proportion of inorganic-N consumed.

Densité cellulaire 10 ⁶ cellules.ml ⁻¹	Taux de dilution D (d ⁻¹)	N/C at/at	Y _N
1,4	1,20	0,09	0,20
7,5	0,47	0,14	0,25
22,2	0,33	0,15	0,60

(Tabl. II) témoignent d'un fort taux d'utilisation des NO₃⁻ tout en reflétant une assimilation et une incorporation efficaces de NO₃⁻ par la Diatomée. Ce comportement s'explique par une amélioration du contenu intracellulaire des acides aminés libres responsables de l'assimilation de l'azote (GLN, ASN et GLU; Marsot *et al.*, 1991a).

REMERCIEMENTS - Nous tenons à souligner l'assistance de Madame Hélène Goulet pour le traitement de texte. Nous remercions le Dr. M. Loudiki pour la révision du manuscrit et l'analyse critique des résultats. Cette recherche a reçu l'appui financier de l'organisme AUELF-UREF (Université des réseaux d'expression française) et du fonds institutionnel de recherche de l'Institut National de la Recherche Scientifique (Québec).

BIBLIOGRAPHIE

- BOROWITZKA M.A. and B.E. VOLCANI, 1978. The polymorphic diatom *P. tricornutum* : ultrastructure of its morphotypes. *J. Phycol.* **14** : 10-21.
- CAPERON J., 1968. Population growth response of *Isochrysis galbana* to variable nitrate environment. *Ecology.* **49** : 866-872.
- DARLEY W.M., 1968. Deoxyribonucleic acid content of the three cell types of *P. tricornutum* (Bohlin). *J. Phycol.* **4** : 219-220.
- DROOP M.R., 1968. Vitamins B₁₂ and marine ecology : IV. The kinetics of uptake growth and inhibition in *Monochrysis lutheri*. *J. of the Mar. Biol. Ass. U.K.* **48** : 689-733.
- DUKE E.L. and B.E.F. REIMANN, 1977. The ultrastructure of the diatom cell. In *The Biology of Diatoms*, Edited by D. Werner. Univ. California Press, Berkeley and Los Angeles : 65-109.
- GOLDMAN J.C., J.J. Mc CARTHY and D.G. PEAHEY, 1979. Growth rate influence on the chemical compo-

- sition of phytoplankton in oceanic waters. *Nature* **279** : 210-215.
- GUILLARD R.R.L. and J.H. RYTHER, 1962. Studies of marine planktonic diatoms. I. *Cyclotella nana* Hustedt and *Detonula confervacea* (Cleve) Grun. *Can. J. Microbiol.* **8** : 229-239.
- IWASA K., S. MURAKAMI, A. SHIMIZU and K. IMAHORI, 1972. Mechanisms of dimorphism and motility of *Phaeodactylum tricornerutum* Bohlin. In Proceedings of the Seventh International Seaweed Symposium, Edited by K. Nisizawa. Univ. Tokyo Press : 319-322.
- IWASA K. and A. SHIMIZU, 1972. Motility of the diatom *Phaeodactylum tricornerutum*. *Exptl Cell Res.* **74** : 552-558.
- LEWIN J.C., R.A. LEWIN and D.E. PHILPOTT, 1958. Observations on *Phaeodactylum tricornerutum*. *J. gen. Microbiol.* **18** : 418-426.
- MARSOT P., A.D. CEMBELLA and J.C. COLOMBO, 1991a. Intracellular and extracellular amino acids pools of the marine diatom *Phaeodactylum tricornerutum* (Bacillariophyceae) grown on unenriched seawater in high cell-density dialysis culture. *J. Phycol.* **27** : 478-491.
- MARSOT P., A. CEMBELLA and L. HOULE, 1991 b. Growth kinetics and nitrogen- nutrition of the marine diatom *Phaeodactylum tricornerutum* in continuous dialysis culture. *J. Appl. Phycol.* **3** : 1-10.
- MARSOT P., A.D. CEMBELLA and K. MOUHRI, 1992. Croissance de la biomasse azotée de *Phaeodactylum tricornerutum* (Bacillariophyceae) en cultures discontinues dialysante et non dialysante. *Can. J. Microbiol.* **38** : 945-952.
- MARSOT P. et L. HOULE, 1989. Excrétion cellulaire et morphogénèse de *Phaeodactylum tricornerutum* (Bacillariophyceae). *Botanica marina.* **32** : 355-367.
- MONOD J., 1950. La technique de culture continue. Théorie et applications. *Ann. Inst. Pasteur. Paris.* **79** : 390-410.
- MONOD J., 1942. Recherches sur la croissance bactérienne. Masson, Paris.
- NELSON D.M., J.J. GOERING, S.S. KILHAM and R.R.L. GUILLARD, 1976. Kinetics of silicic acid uptake and rates of silica dissolution in the marine diatom *Thalassiosira pseudonana*. *J. Phycol.* **12** : 246-252.
- NEUVILLE D., P. DASTE and L. GENEVES, 1971. Sur une souche axénique de *Phaeodactylum tricornerutum* (Bohlin) isolée à partir d'une claire ostréicole de l'île d'Oléron. *C.R. Acad. Sc. Paris.* **273** sér. D : 1221-1223.
- PARSONS T.R., K. STEPHENS and J.D.H. STRICKLAND, 1961. On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankters. *J. Fish. Res. Board Can.* **18** : 1001-1016.
- REIMANN B.E.F. and B.E. VOLCANI, 1968. Studies on the biochemistry and fine structure of silica shell formation in Diatoms III. The structure of the cell wall of *Phaeodactylum tricornerutum* Bohlin. *J. Ultrastructure Res.* **21** : 182-193.
- RHEE G.Y., 1978. Effects of N : P atomic ratios and nitrate limitation on algal growth, cell composition, and nitrate uptake. *Limnol. Oceanogr.* **23** : 10-25.
- RILEY G.A., 1943. Physiological aspects of spring diatom flowerings. *Bull. Bingham Oceanographic Collection VIII.* Art. **4** : 1-53.
- SINCLAIR M., 1978. Summer phytoplankton variability in the lower St. Lawrence Estuary. *J. Fish. Res. Board Can.* **35** : 1171-1185.
- STRICKLAND J.D.H. and T.R. PARSONS, 1972. A practical handbook of seawater analysis, 2nd ed. *Bull. Fish. Res. Bd Can.* **167** : 310 p.
- SYRETT P.J., 1988. Uptake and utilization of nitrogen compounds. In Biochemistry of the algae and cyanobacteria. Proceedings of the Phytochemical Society of Europe. Edited by L.J. Rogers and J.F. Gallon. Oxford University Press, Oxford. 23-39.

Reçu le 20 octobre 1994; received October 20, 1994
Accepté le 6 janvier 1995; accepted January 6, 1995

IMPACT DE LA STATION D'ÉPURATION (STEP) DE NEUCHÂTEL (SUISSE) ET SURVEILLANCE DE L'ÉPIPÉLON LITTORAL DU LAC DE NEUCHÂTEL

*Impact of the sewage purification plant of Neuchâtel (Switzerland)
and observation of the littoral epipelon of lake Neuchâtel*

F. STRAUB¹ ET M. GLAUSER²

¹Laboratoire d'algologie, Gymnase cantonal, CH-2300 La Chaux-de-Fonds, Suisse

²Biol-Conseils SA, rue de la Serre 5, CH-2000 Neuchâtel, Switzerland

ALGUES
DIATOMÉES
BACILLARIOPHYCEAE
SUISSE
INDICE SAPROBIQUE
ÉPIPÉLON
LAC
STATION D'ÉPURATION
IMPACT
RESTAURATION
MÉTHODOLOGIE
DIAGNOSTIC

RÉSUMÉ – La station d'épuration de la Ville de Neuchâtel est en service depuis 25 ans. Des travaux de rénovation des installations sont en cours, ainsi que des travaux d'assainissement destinés à améliorer la qualité des rejets, qui ne satisfont plus actuellement aux normes fédérales suisses. Les eaux de rejets sont déversées dans le lac de Neuchâtel, à l'est de la ville dans la Baie de St. Blaise. Pour mesurer l'état de santé de l'interface eau/sédiment dans la zone réceptrice et pour suivre l'effet des divers travaux d'assainissement au cours du temps, un programme de surveillance des assemblages épipéliques de Diatomées et de mesures physico-chimiques a été développé sur le littoral de la commune de Neuchâtel. Ce programme d'observations est appliqué à une zone vierge d'impact (référence) et aux endroits qui subissent les rejets (effluent et déversoirs d'orages). Pour comparer les assemblages de Diatomées et livrer une classification des états de santé des interfaces eau/sédiment, deux indices ont été calculés : l'indice saprobique basé sur l'analyse des groupes d'espèces différentielles de Lange-Bertalot et la fréquence relative des espèces plus ou moins hétérotrophes. La composition des assemblages trouvés permet de comparer les stations de manière relative. Sur le plan absolu cependant, la signification des indices saprobiques appliqués à de l'épipélon lacustre est en question, en particulier pour savoir si les indices de II-(III), trouvés dans la zone de rejet, sont déjà signe d'un état critique, comme les indices II-III en rivière. Des déficits d'oxygène dissous de 35 à 40 %, bien corrélés avec les taux de Diatomées hétérotrophes, semblent amener une réponse affirmative, auquel cas le calcul classique de l'indice saprobique par l'analyse des groupes d'espèces différentielles ne serait pas tout à fait assez sévère pour être appliqué, sans calibrage, à l'épipélon du lac de Neuchâtel.

ALGAE
DIATOMS
BACILLARIOPHYCEAE
SWITZERLAND
SAPROBIC INDEX
EPIPELON
LAKE
SEWAGE PURIFICATION PLANT
IMPACT
RESTAURATION
METHODOLOGY
MONITORING

ABSTRACT – The sewage purification plant of Neuchâtel-City is operating since 25 years. Some renovating works are in progress, because the quality of the sewage effluents, don't more comply with the swiss standards. The sewage effluent is flowing into lake Neuchâtel, eastern from the town, in the gulf of St. Blaise. A study including epipellic diatoms, physical and chemical measures, is developed on the littoral of the lake, to measure the health conditions of the interface water/sediment and to follow the course of the renovating works. This program is applied to a preserved station (reference) and to zones influenced by waste water (from the sewage effluent and from storm overflows). A saprobic index, based on the analytical method of the groups of differential species of Lange-Bertalot and the sum of relative frequencies of more or less heterotrophic diatoms, were choosen, for comparing the stations with each other. The composition of the assemblages allows to compare the stations in a relative way. But some problems are arising from the use of the absolute values of the saprobic index to qualified the epipelon. In particular, following question lies open : does the index II-(III) found in polluted stations indeed show a critical saprobic state, like the indices II-III in rivers ? The oxygen deficiencies found between 35 and 40 %, well correlated with the relative frequencies of heterotrophic diatoms, seems to give answer in the affirmative. In that case, the classical diagnosis chart used to calculate saprobic indices is not hard enough, without calibration, to be applied to the epipelon of lake Neuchâtel.

INTRODUCTION

La station d'épuration de la Ville de Neuchâtel, inaugurée en 1970, a été construite alors avec une capacité de 75 200 équivalents-habitants. Après 25 ans de fonctionnement, des travaux de rénovation des installations sont nécessaires. Bien que la capacité initiale n'ait pas encore été atteinte, les rejets de cette station ne satisfont pas aux nouvelles normes fédérales suisses. Par exemple actuellement, 40 % des valeurs annuelles de DBO₅, 30 % des valeurs de DCO, 20 % des teneurs en matières en suspension et 20 % des teneurs de P-total dépassent les normes. Ainsi parallèlement, des travaux d'assainissement destinés à améliorer la qualité des rejets sont également en cours.

Les eaux de rejets sont déversées dans le lac de Neuchâtel, à l'est de la ville. Les eaux réceptrices sont celle de la baie nord-est (baie de Saint-Blaise), qui est une zone de pente faible, dans laquelle le taux de sédimentation est plus important, qu'à l'ouest de la ville. Directement influencés par l'effluent, les sédiments de nature sapropélique des stations 3 et 4 (figure 1) portent la trace des rejets. Leur couleur brun-noir est visible en plongée.

Pour mesurer l'état de santé de ces sédiments et pour suivre l'effet des divers travaux d'assainissement au cours du temps, un programme de surveillance des assemblages épipélés de diatomées et de mesures physico-chimiques a été développé sur le littoral de la commune de Neuchâtel, dans une zone vierge d'impact et aux endroits qui subissent les rejets. L'épipélon a été

choisi car il intègre les variations de conditions écologiques de l'interface sédiment/eau. L'analyse du périphyton sur substrats artificiels a été écartée pour deux raisons. Tout d'abord parce que cette communauté n'est dépendante que de l'eau (dont la qualité est très influencée par les courants) et que certaines des stations de prélèvement sont en zone de pêche (risques de ne pas retrouver les substrats artificiels). Les Diatomées ont été choisies car c'est un groupe d'algues très diversifié, présent dans tous les milieux aquatiques, dans lequel on connaît bien la sensibilité des espèces envers les matières organiques et avec lequel plusieurs indices de qualité d'eau ont été développés (Lange-Bertalot 1978, 1979a et b, Krammer et Lange-Bertalot 1986-1991, Coste 1978, 1986, Coste *et al.*, 1991, Rumeau et Coste 1988, Leclercq et Maquet 1987).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Six lieux de prélèvement ont été choisis (Fig. 1) :

- station 1. Monruz, profondeur 3-4 m, distance de la rive env. 20 m. A proximité d'un déversoir d'orage.
- station 2. STEP, profondeur 2-3 m, distance de la rive env. 3 m. Cette station est située entre la rive et l'effluent. Elle n'est donc pas directement influencée par les rejets d'épuration.
- station 3. STEP; profondeur 6 m, distance de la rive env. 30 m.
- station 4. STEP, profondeur 9 m, distance de la rive env. 70 m.
- station 5. Quai Osterwald, profondeur 3-4 m, distance de la rive env. 35 m. A proximité d'un déversoir

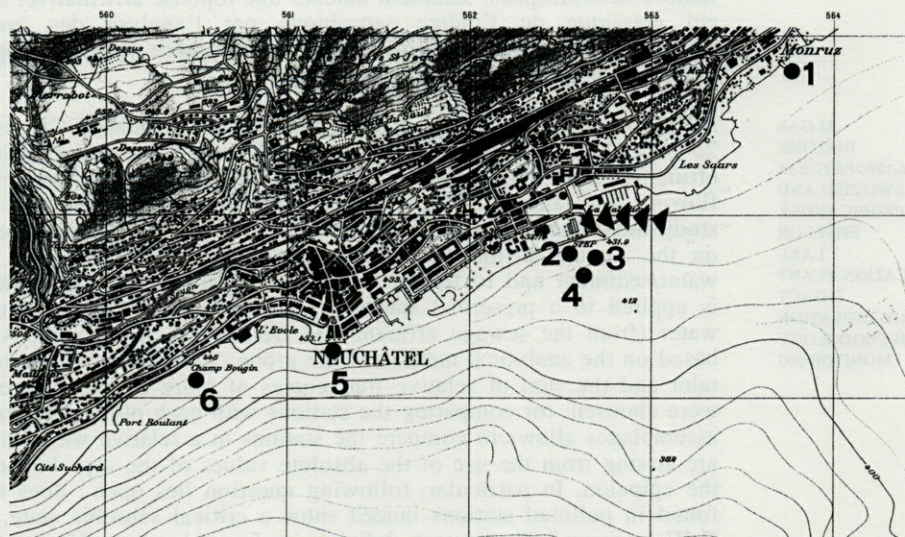


Fig. 1. – Répartition des six stations de prélèvements sur le littoral du lac de Neuchâtel. La série de flèches situe la station d'épuration.

Distribution of the six sampling stations on the littoral zone of Lake Neuchâtel. Arrows indicate the emplacement of the sewage purification plant.

d'orage.

station 6. Champ-Bougin, profondeur 3-4 m, distance de la rive env. 30 m.

Les stations de prélèvement 2 et 3 sont les plus directement influencées par les rejets de la station d'épuration, car l'effluent se situe à 5 m du bord et à 2,8 m de profondeur. La station 1 (Monruz) se situe dans le même contexte hydrologique que les stations 2-4 (baie de St. Blaise, pente faible, sédimentation active). Les stations 5 et 6 sont situées à des endroits moins abrités (pente plus raide, sédimentation moins active). La station 6 est située à proximité de la prise d'eau destinée à la distribution d'eau potable (station de pompage de Champ-Bougin). Les stations choisies au large de la STEP sont destinées à estimer l'impact de la station d'épuration sur les sédiments du lac. La station 6 sert de référentiel.

Pour l'instant, 2 campagnes de prélèvements ont été effectuées : l'une, le 7 octobre 1993, après une période ventée, à la fin de la stratification estivale ; l'autre le 24 avril 1994, après 15 jours de calme, pendant la période de croissance printanière.

Les échantillons ont été prélevés en plongée, en prenant soin de déranger au minimum la surface des sédiments, afin de réduire l'effet d'intégration pluriannuel par mélange, dû à la sédimentation et à la bonne conservation des squelettes de Diatomées. La partie aqueuse, non consolidée du sédiment a été aspirée délicatement au moyen d'une seringue munie d'un embout flexible (ROUND 1981 modifié). Les échantillons ont été directement fixés au formol et conservés en bouteilles de PET.

Les échantillons sont attaqués avec quelques gouttes d'HCl concentré pour dissoudre les minéraux carbonatés. Ensuite ils sont attaqués à H₂O₂ pour oxyder les matières organiques. Les squelettes nettoyés de Diatomées sont montés entre lame et lamelle dans du Naphrax.

Les préparations microscopiques sont observées en optique à fort grossissement (12,5 × 100). Un sous-échantillon statistiquement représentatif d'au moins 500 valves est dénombré. Pendant le comptage les individus sont attribués aux taxons reconnus jusqu'aux niveaux taxonomiques de la variété ou de l'écotype. Seuls les individus entiers ont été dénombrés. Les individus fragmentés ou portant des traces de dissolution ont été écartés du dénombrement, pour réduire l'influence de la dérive et de la contamination par les sédiments anciens.

La taxonomie utilisée est essentiellement basée sur la flore de Krammer et Lange-Bertalot 1986-1991.

Le diagnostic de l'état de santé de l'interface sédiment/eau aux stations étudiées, n'est basé que sur l'abondance relative des taxons benthiques. Ainsi les fréquences des taxons planctoniques (bien que pouvant aussi vivre parfois dans le benthos) n'ont pas été intégrés aux calculs. Cette précaution a été prise pour deux raisons :

- l'origine planctonique ou benthique des individus trouvés ne peut pas être attestée ;
- la sensibilité aux matières organiques de la plupart des taxons planctoniques est mal (voire pas du tout) connue.

L'interprétation des résultats a été conduite selon deux méthodes :

a. Méthode des groupes d'espèces différentielles de classes saprobiques (Lange-Bertalot 1978, 1979a et b, Krammer et Lange-Bertalot 1986-1991).

Cette méthode consiste à assigner à chaque taxon un indice de sensibilité envers les matières organiques et les autres molécules réduites habituellement présentes dans les eaux résiduelles. Ces indices ont été attribués empiriquement au cours d'études extensives d'observations de populations *in situ* ou au cours d'expérimentations ponctuelles en milieux artificiels (valeurs des indices tirés de Krammer et Lange-Bertalot 1986-1991, Denys 1991 et Hofmann 1993). L'indice de quatre degrés (1 = très sensible à 4 = très tolérant) indique jusqu'à laquelle des quatre classes saprobiques (I, oligosaprobie à IV, polysaprobie, Kolkwitz 1950, Liebmann 1958, Slàdeček 1973) chaque taxon peut résister. Le diagnostic est posé à partir de la fréquence relative des quatre groupes de sensibilité à l'intérieur de l'assemblage de Diatomées trouvé. Cette méthode, contrairement à celles des indicateurs de classe, reconnaît pour des autotrophes vrais comme la plupart des Diatomées, qu'il n'y a pas en principe de dépendance directe de ces organismes aux matières organiques, mais seulement une tolérance plus ou moins marquée. Ainsi, on peut trouver tous les taxons, en faible abondance (forte concurrence) dans les basses classes de charge organique, tandis que dans les classes élevées, seuls quelques taxons tolérants peuvent vivre en abondance (faible concurrence). La définition des classes saprobiques ainsi que l'échelle de diagnostic (en particulier pour les classes II, II-III) à partir des assemblages de Diatomées sont discutées d'après les propositions de Krammer et Lange-Bertalot 1986-1991 et de Hofmann 1987. Cette méthode a été choisie, plutôt que l'utilisation des autres indices diatomiques, car elle a déjà été utilisée avec succès en Suisse, en particulier pour qualifier l'état de santé de rivières jurassiennes (Elber *et al.*, 1994a, 1994b).

b. Méthode qui consiste à étudier la distribution de taxons plus ou moins hétérotrophes (Cholnoky 1968).

En effet certaines Diatomées assimilent facultativement des composés organiques. Si l'utilisation de ces composés comme source de carbone ou d'énergie semble reconnue, cette utilisation comme source d'azote (Hellebust & Lewin 1977, Admiraal *et al.*, 1987, Van Dam *et al.*, 1994) est sujette à caution (Krammer et Lange-Bertalot 1986-1991) ou est en tous cas en discussion. D'autre part, au vu de la littérature existante à notre connaissance, l'emploi des qualificatifs « hétérotrophe facultatif ou obligatoire » (même envers le carbone) nous semble prématuré pour l'instant. Ainsi nous préférons adopter ici une position prudente, en qualifiant les espèces concernées de « plus ou moins hétérotrophes ». La présence de ces Diatomées est connue dans les eaux d'épuration (Fesel 1984), dans les abreuvoirs naturels du gibier (Wuthrich 1975) ou sur les bouses de vaches en voie de décomposition (Straub-non pub.). Ces espèces sont naturellement présentes en petite quantité (2-5%) dans les assemblages benthiques

du lac de Neuchâtel (Wuthrich 1960, Straub 1989) : elles font partie des décomposeurs normalement présents dans les systèmes équilibrés. Les indications physio-écologiques des taxons plus ou moins hétérotrophes proviennent de Van Dam 1979 et de Denys 1991. La présence de matières organiques favorise le développement et provoque des abondances locales anormales de ces Diatomées particulières.

RÉSULTATS

La flore trouvée dans les échantillons est composée de 171 taxons. Cette flore se décompose de la manière suivante :

- 128 taxons benthiques dont on connaît la sensibilité. Ces taxons forment 97 à 99 % des assemblages analysés ;
- 20 taxons benthiques dont on ne connaît pas la sensibilité ;
- 23 taxons planctoniques ou tychoplanctoniques.

L'abondance des taxons non classés dans le gradient de sensibilité est négligeable et n'influence pas le diagnostic de qualité.

La liste floristique complète, les valences auto-écologiques et les abondances relatives des taxons figurent sur un tableau général, que l'on peut commander sans charge, chez le premier auteur (sur envoi d'une disquette de 3,5", MacIntosh). L'assemblage de base, qui définit le type de végétation trouvée, est dominé par *Achnanthes minutissima* var. *minutissima* Lange-Bert. et par *Amphora pediculus* (Kütz.) Grun., les deux taxons les plus fidèles et les plus abondants de tout le périphyton naturel des lacs carbonatés du Jura (Straub 1982, 1989). Cet assemblage de base est le mieux développé en automne. Aux stations 3 et 4 (directement influencées par les rejets de la STEP), la présence du premier des deux taxons est masquée par le développement remarquable de *Navicula schoenfeldii* (Hust.). Cette composition particulière signale que les conditions trophiques à ces stations sont anormalement élevées. Ces stations se caractérisent aussi par des taux plus élevés des principales Diatomées résistantes suivantes : *Achnanthes lanceolata* ssp. *frequentissima* Lange-Bert., *Fragilaria capucina* var. *vaucheriae* (Kütz.) Lange-Bert., *Navicula menisculus* Schum., *N. pupula* Kütz., toutes tolérantes, ainsi que *Navicula accomoda* Hust., *N. atomus* var. *permitis* (Hust.) Lange-Bert., *N. minima* Grun., *N. seminulum* Grun., *Nitzschia capitellata* Hust., *N. palea* (Kütz.) W. Smith, toutes très tolérantes. Au printemps, les assemblages sont temporairement modifiés ou enrichis par les taxons colonisateurs comme *Diatoma ehrenbergii* Kütz. (st. 2), *Fragilaria capucina* Dem. var. *capucina* (st. 1) ou *Fragilaria capucina* var. *mesolepta* (Rabenh.) Rabenh. (st. 2,3,5 et 6).

L'importance des 4 classes de sensibilité (somme des abondances relatives de chaque taxon attribué à chaque classe de sensibilité) trouvées dans la végétation des six stations se trouve sur le tableau I et est exprimée graphiquement sur la figure 2. La classe la mieux représentée est celle des Diatomées sensibles. Les Diatomées tolérantes et très tolérantes sont présentes partout, mais à des taux inférieurs ou près de 10 % aux stations non touchées directement par l'effluent. Dans les stations (2), 3 et 4 influencées par la STEP, la somme de ces deux classes représente de 15 à 27,8 % de la végétation. Le 26 avril 1994 à la station 2, l'importance des Diatomées très sensibles provient de la forte croissance de *Diatoma ehrenbergii* Kütz. Cette abondance n'est probablement pas révélatrice de conditions particulières à l'interface eau/sédiment mais plutôt de la colonne d'eau à cet endroit, car cette espèce est souvent tychoplanctonique (Huber-Pestalozzi 1942). La différence de composition de la végétation des sta-

Tabl. I. - La composition de la végétation est exprimée par la somme des abondances relative des taxons regroupés par classes de sensibilité envers les matières organiques. La classe 2 de sensibilité est la mieux représentée. Figurent également la somme des abondances relatives de Diatomées hétérotrophes et le déficit en oxygène dissous aux six stations étudiées. Les stations 3 et 4 se distinguent par les taux les plus élevés de Diatomées tolérantes et très tolérantes, de Diatomées plus ou moins hétérotrophes, en corrélation avec des déficits en oxygène dissous dépassant 30 %. Pour l'acceptation de la notion d'hétérotrophie, se référer au texte.

The composition of the vegetation is given as the sum of the relative frequencies of the taxa, which are grouped into sensibility classes against organic matter. The class 2 is the most represented. The sum of the relative frequencies of heterotrophic diatoms is also given, with the oxygen deficiencies measured at the sampling stations. At stations 3 and 4, are found the higher frequencies of tolerant and most tolerant diatoms, the higher frequencies of more or less heterotrophic ones, well correlated with oxygen deficiencies higher than 30 %. The sense given to the term heterotrophy is explain in the text.

Classes	stations	1	2	3	4	5	6
7-oct-94							
1. très sensibles		9.3	6.8	7.2	6.3	11.5	8.5
2. sensibles		78.5	81.0	64.2	64.1	75.7	84.3
3. tolérants		7.3	6.8	12.5	15.0	6.2	3.2
4. très tolérants		3.3	4.0	14.3	12.8	4.3	1.0
Σ hétérotrophes		3.3	5.7	13.8	12.4	4.2	2.6
déficit en oxygène [%]		0.71	2.74	36.17	45.29	-9.42	-6.38
26-avr-94							
1. très sensibles		9.4	26.0	8.4	9.2	5.6	8.0
2. sensibles		78.0	58.2	70.7	70.8	81.3	83.7
3. tolérants		7.8	8.8	11.2	12.8	8.8	6.1
4. très tolérants		2.2	6.3	8.4	4.6	3.0	0.4
Σ hétérotrophes		4.0	4.7	8.0	4.6	3.9	1.5
déficit en oxygène [%]		12.9	12.03	33.3	45.0	9.2	11.1

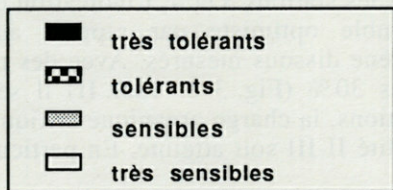
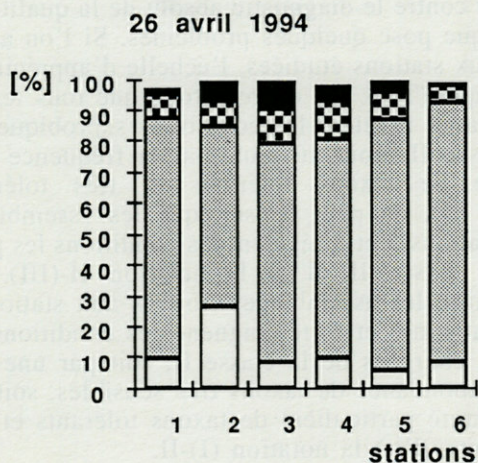
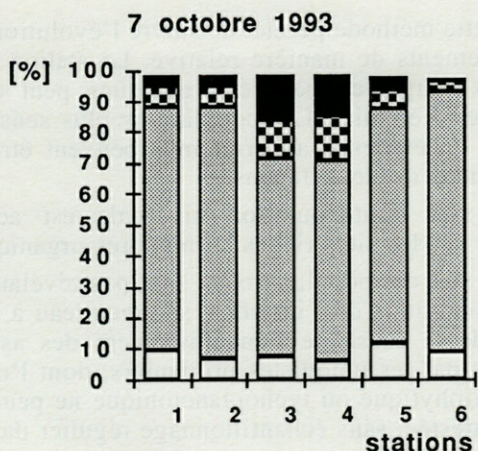


Fig. 2. – Distribution des fréquences relatives de Diatomées par classe de sensibilité aux six stations étudiées. Les stations 3 et 4 présentent des taux de 20 à 30% de Diatomées tolérantes et très tolérantes.

Distribution of relative frequencies of diatoms into the classes of sensibility in the sampling stations. At stations 3 and 4, 20 to 30% of tolerant and most tolerant diatoms were found.

tions 3 et 4 est mieux marquée en automne. Aux stations 1 et 5, qui reçoivent certaines quantités d'eaux usées diluées pendant les orages (déversoirs d'orages), l'épipélon ne porte pas de trace marquée de cet impact. La végétation la plus sensible a été trouvée à la station 6, près du captage d'eau de la Ville de Neuchâtel.

Les Diatomées plus ou moins hétérotrophes (Van Dam 1979, Denys 1991) suivantes ont été

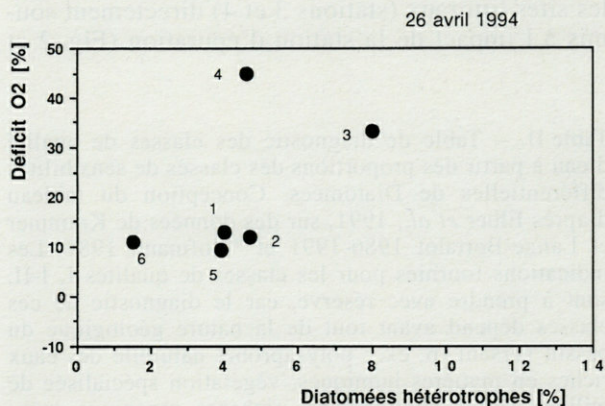
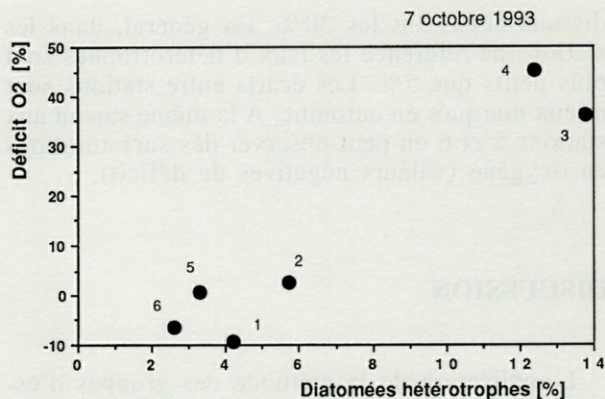


Fig. 3. – Distribution des fréquences relatives de Diatomées plus ou moins hétérotrophes en fonction du déficit en oxygène dissous aux six stations étudiées. Les stations 3 et 4 présentent des abondances maximales de Diatomées hétérotrophes et des déficits d'oxygène dissous dépassant 30%. Au printemps, la différence entre stations est moins marquée. Pour l'acceptation de la notion d'hétérotrophie, se référer au texte.

Distribution of relative frequencies of more or less heterotrophic diatoms in terms of oxygen deficiency at the sampling stations. Higher frequencies of heterotrophic diatoms were found at stations 3 and 4, where oxygen deficiencies higher than 30% were measured. In spring, differences between stations are lesser important. The sense given to the term heterotrophy is explain in the text.

observées : *Gomphonema parvulum* (Kütz.) Kütz., *Navicula atomus* (Kütz.) Grun., *N. atomus* var. *permissis* (Hust.) Lange-Bert., *N. goeppertiana* (Bleisch) H.L. Smith, *N. gregaria* Donkin, *N. minima* Grun., *N. pelliculosa* (Bréb.) Hilse, *N. saphrophila* Lange-Bert., *N. seminulum* Grun., *N. tripunctata* Hilse, *Nitzschia capitellata* Hust., *N. palea* (Kütz.) W. Smith. Les sommes des abondances de ces Diatomées trouvées aux six stations sont distribuées par rapport aux taux de déficit en oxygène dissous, sur la figure 3. Des abondances maximales (8 à 13,8%) ont été trouvées aux stations 3 et 4, corrélées avec des déficits d'oxygène

dissous dépassant les 30 %. En général, dans les stations de référence les taux d'hétérotrophes sont plus petits que 5 %. Les écarts entre stations sont mieux marqués en automne. A la même saison aux stations 5 et 6 on peut observer des sursaturations en oxygène (valeurs négatives de déficit).

DISCUSSION

L'application de la méthode des groupes d'espèces différentielles de classes saprobiques à de l'épipélon lacustre permet de mettre en évidence les sites littoraux (stations 3 et 4) directement soumis à l'impact de la station d'épuration (Fig. 2 et

Table II. – Table de diagnostic des classes de qualité d'eau à partir des proportions des classes de sensibilités différentielles de Diatomées. Conception du tableau d'après Elber *et al.*, 1991, sur des données de Krammer et Lange-Bertalot 1986-1991 et *Hofmann 1987. Les indications fournies pour les classes de qualités I, I-II, sont à prendre avec réserve, car le diagnostic de ces classes dépend avant tout de la nature géologique du bassin versant (p. ex. : polysaprobie naturelle des eaux riches en matières humiques, végétation spécialisée de milieux salins continentaux, richesse organique naturelle des lacs eutrophes carbonatés).

*Diagnosis chart of water qualities using the proportions of discriminating sensibilities of diatoms. Chart conceived after Elber et al., 1991, on data from Krammer et Lange-Bertalot 1986-1991 and *Hofmann 1987. Given indications for the water qualities I, I-II must be critical considered because the diagnosis of these two classes depends mostly on the geological nature of the watershed (i.e. natural polysaprobic waters from peat-bogs, specialized vegetation from continental saline environments, natural organic richness of carbonated eutrophic lakes).*

Classes de qualités saprobiques	Proportion des groupes d'espèces différentielles de diatomées
I : oligosaprobie Non chargé à peu chargé 95% < saturation O ₂ < 105%	* très sensibles ≥ 90 % sensibles + tolérants + très tolérants ≤ 10 %
I-II : oligo-β-mésosaprobie Peu chargé Déficit d'O ₂ < 15 %	* très sensibles ≥ 50% sensibles + tolérants + très tolérants ≤ 50 %
II : β-mésosaprobie Modérément chargé Déficit d'O ₂ < 30%	très sensibles ≤ 10% sensibles ≥ 50% tolérants + très tolérants < 50%
II-III : β-α-mésosaprobie Charge critique Déficit d'O ₂ < 50%	0% < sensibles < 50% 50% ≤ tolérant + très tolérants < 90%
III : α-mésosaprobie fortement pollué Déficit d'O ₂ < 75%	sensibles ≤ 10% tolérants ≤ 50% très tolérants < 50%
III-IV : α-mésopolysaprobie très fortement pollué Déficit d'O ₂ < 90%	10% < sensibles + tolérants < 50% très tolérants > 50%
IV : polysaprobie excessivement pollué Déficit d'O ₂ > 90%	sensibles + tolérants ≤ 10% très tolérants ≥ 90%

3). Cette méthode permet de suivre l'évolution des peuplements de manière relative. La station 6, la moins chargée en matières organiques, peut servir de site référentiel. Les populations plus sensibles mises en évidence au printemps peuvent être interprétées de deux façons :

- soit l'autoépuration hivernale est active, même sur les sites riches en matières organiques ;
- soit ces populations ne sont pas révélatrices des conditions de l'interface sédiment/eau à cette période, à cause de l'envahissement des assemblages par les ubiquistes printaniers, dont l'origine périphtyque ou tychoplanctonique ne peut pas être attestée, sans échantillonnage régulier dans la colonne d'eau.

Par contre le diagnostic absolu de la qualité saprobique pose quelques problèmes. Si l'on applique aux stations étudiées, l'échelle d'appréciation classique (Tabl. II), on remarque que tous les assemblages révèlent les conditions saprobiques de la classe II. Tout au plus, par la fréquence plus élevée de taxons tolérants et très tolérants (Tabl. III), on peut penser, que les assemblages des stations 3 et 4 révèlent les conditions les pires de la classe II, d'où la notation II-(III). Au contraire, les assemblages trouvés aux stations 5 (en automne) et 6, témoignent des conditions les moins chargées de la classe II, soit par une certaine abondance de taxons très sensibles, soit par une rareté particulière de taxons tolérants et très tolérants, d'où la notation (I)-II.

Pour les stations 3 et 4, l'indication de diagnostic semble optimiste par rapport aux déficits d'oxygène dissous mesurés. Avec des taux dépassant les 30 % (Fig. 3 et Tabl. II) il semble qu'à ces stations, la charge organique critique de classe de qualité II-III soit atteinte. En particulier en au-

Tabl. III. – Composition des assemblages épipéloniques de Diatomées du littoral du Lac de Neuchâtel (Commune de Neuchâtel) et valeurs saprobiques biocénotiques.

Composition of the epipellic assemblages of diatoms from the littoral of lake Neuchâtel (Commune of Neuchâtel) and biocoenotic saprobic values.

Classes	stations	1	2	3	4	5	6
7-oct-94							
1. très sensibles		9.3	6.8	7.2	6.3	11.5	8.5
2. sensibles		78.5	81.0	64.2	64.1	75.7	84.3
3. tolérants		7.3	6.8	12.5	15.0	6.2	3.2
4. très tolérants		3.3	4.0	14.3	12.8	4.3	1.0
Σ 3 et 4		10.6	10.8	26.9	27.8	10.6	4.3
qualité saprobique							
		II	II	II-(III)	II-(III)	(I)-II	(I)-II
26-avr-94							
1. très sensibles		9.4	26.0	8.4	9.2	5.6	8.0
2. sensibles		78.0	58.2	70.7	70.8	81.3	83.7
3. tolérants		7.8	8.8	11.2	12.8	8.8	6.1
4. très tolérants		2.2	6.3	8.4	4.6	3.0	0.4
Σ 3 et 4		9.9	15.0	19.6	17.4	11.8	6.5
qualité saprobique							
		II	II	II-(III)	II-(III)	II	(I)-II

tomne 1993, après une période d'agitation, les déficits ne semblent pas naturels, car dans le lac de Neuchâtel, dont la longueur est parallèle à l'axe des vents dominants, les mélanges dûs aux perturbations météorologiques atteignent 15 à 30 mètres de profondeur, même pendant la stratification thermique (Besson 1991).

Ces problèmes de diagnostic sont probablement liés au fait que l'échelle d'appréciation provient d'observations empiriques faites en rivières, en principe sur de l'épilithon (communautés fixées au substrat). Cette situation idéale permet de ne baser le diagnostic, que sur les communautés de Diatomées présentes aux différentes stations étudiées et d'éviter la prise en compte des individus provenant de la dérive. Dans le domaine lacustre, les courants littoraux entraînent en profondeur des individus qui proviennent de la zone la plus productive riche en oxygène (entre 0,5 et 1 m de profondeur, Straub 1989), en particulier ici les petites cellules des espèces sensibles à fort pouvoir de multiplication comme *Achnanthes minutissima* var. *minutissima* Lange-Bert. et *Amphora pediculus* (Kütz.) Grun. Ces deux taxons sont représentés ici en surnombre dans tous les assemblages, ce qui a pour effet de ramener l'indication au sein de la classe II. On peut penser, qu'une modification de l'échelle de diagnostic soit souhaitable (H. Lange-Bertalot, com. orale) pour pouvoir appliquer la méthode des groupes d'espèces différentes à l'épipélon lacustre du lac de Neuchâtel. D'après les résultats obtenus grâce à cette première approche, le niveau de charge critique (II-III) devrait être diagnostiqué sur la base d'assemblages dont : l'abondance des taxons tolérants et très tolérants dépassent 20 %, l'abondance des taxons sensibles est réduite de 15 à 20 % par rapport aux assemblages référentiels. Ces indications sont à prendre pour l'instant sous toute réserve, car il n'est pas exclu, qu'une certaine part de l'abondance des groupes d'espèces tolérantes et très tolérantes aux stations 3 et 4, soit liée à la profondeur des sites de prélèvement. Une prospection plus intensive au large de la station 6, (pour établir un transect référentiel) permettra sans doute de lever l'incertitude et de mieux calibrer l'échelle d'interprétation.

REMERCIEMENTS – Nos remerciements vont à B. Zaugg, du bureau Aquarius, Neuchâtel et à H. Havlicek, plongeuse engagée par le bureau Biol-Conseils, Neuchâtel, pour leur aide technique lors des prélèvements. R. Stettler, chimiste de la Ville de Neuchâtel, pour les analyses chimiques. H. Lange-Bertalot, de Francfort, M. Coste, de Bordeaux et L. Leclercq, de Liège dont les remarques pertinentes, nous ont permis de mieux interpréter nos résultats. Un lecteur anonyme pour ses conseils, en particulier à propos de l'emploi de la notion d'hétérotrophie chez les Diatomées.

BIBLIOGRAPHIE

- ADMIRAAL W., C. RIAUX-GOBIN et R.W.P.M. LAANE, 1987. Interaction of ammonium, nitrate, and D- and L-aminoacids in the nitrogen assimilation of two species of estuarine benthic diatoms. *Mar. Ecol. Progr. ser.* **40** : 267-273.
- BESSON O., 1991. Quelques remarques sur les ondes internes dans le lac de Neuchâtel. Polycop. Inst. mathématiques, Univers. Neuchâtel : 1-18.
- CHOLNOKY B.J., 1968. Die Oekologie der Diatomeen in Binnengewässern, J. Cramer, Lehre, 1-699.
- COSTE M., 1978. Sur l'utilisation des diatomées benthiques pour l'appréciation de la qualité biologique des eaux courantes. Méthodologie comparée et approche typologique. Thèse, Univ. Franche-Comté : 1-143.
- COSTE M., 1986. Qualité biologique des eaux : les méthodes microfloristiques. ENGREF, Paris : 1-60.
- COSTE M., C. BOSCA et A. DAUTA, 1991. Use of algae for monitoring rivers in France. In : Whitton, B.A., Rott, E., Friedrich, G. (eds), Use of algae for monitoring rivers : 75-88
- DENYS L., 1991. A check-list of the diatoms in the holocene deposits of the western belgian coastal plain with a survey of their apparent ecological requirements. I. Introduction, ecological code and complete list. *Serv. géol. Belgique, Professional paper.* **246** : 1-41.
- ELBER F., K. MARTI & K. NIEDERBERGER, 1991. Pflanzenökologische und limnologische Untersuchung der Reussdelta-Gebietes (Kanton Uri). Ver. Geobot. Inst. ETHZ, Stift. Rübel, Zürich, **105** : 1-272.
- ELBER F., J. HÜRLIMANN, K. NIEDERBERGER, 1994a. Diagnostic de la qualité des eaux et de l'écocomorphologie de la Suze. Rapport AquaPlus (Wollerau), Office de la protection des eaux du canton de Berne, trad. F. Straub : 1-96.
- ELBER F., J. HÜRLIMANN, K. NIEDERBERGER, 1994b. Diagnostic de la qualité des eaux et de l'écocomorphologie de la Birse et de ces affluents. Rapport AquaPlus (Wollerau), Office de la protection des eaux du canton de Berne, trad. F. Straub : 1-96.
- FESEL U., 1984. Die Präsenz von Diatomeen und Diatomeenassoziationen unter den eusaprobien Verhältnissen des Abwasser. Umweltplanung und Umweltschutz. *Schriftenreihe der hessischen Landesanstalt für Umwelt.* **9** : 1-191.
- HELLEBUST & LEWIN, 1977. Heterotrophic nutrition. In Werner, D. (ed.), The biology of diatoms. Botanical Monographs 13, Blackwell, Oxford : 169-197.
- HOFMANN G., 1987. Diatomeengesellschaften saurer Gewässer des Odenwaldes und ihre Veränderungen durch anthropogene Faktoren. Diplomarb. Univers. Frankfurt a Main, 264 S.
- HOFMANN G., 1993. Aufwuchs-Diatomeen in Seen und ihre Eignung als Indikatoren der Trophie. Diss. J. W. Goethe-Universität, Frankfurt am Main : 1-195.
- HUBER-PESTALOZZI G., 1942. Das Phytoplankton des Süßwassers 2 (2) : Diatomeen. In : Thienemann A. (ed), Die Binnengewässer **16** (2) : 367-549.

- KOLKWITZ R., 1950. Oekologie der Saprobien. Ueber die Beziehungen der Wasserorganismen zur Umwelt. *Schriftenreihe Ver. Wasser-, Bod. Lufthyg.* **4**, Piscator Ver., Berlin-Dahlem : 1-64.
- KRAMMER K. et H. LANGE-BERTALOT, 1986 - 91. Bacillariophyceae 1-4. Band 2/1-4 von : Süßwasserflora von Mitteleuropa (begr. von A.Pascher). G. Fischer, Stuttgart.
- LANGE-BERTALOT H., 1978. Diatomeen-Differentiaten anstelle von Leitformen : ein geeigneteres Kriterium der Gewässerbelastung. *Arch. Hydrobiol.*, Suppl., **51** : 393-427.
- LANGE-BERTALOT H., 1979a. Pollution tolerance of Diatoms as a criterion for water quality estimation. *Nova Hedwigia*. **64** : 285-304.
- LANGE-BERTALOT H., 1979b. Toleranzgrenzen und Populationsdynamik benthischer Diatomeen bei unterschiedlich starker Abwasserbelastung, exemplarisch für den unteren Main. *Arch. Hydrobiol.*, Suppl., **56** : 184-219.
- LECLERCQ L. et B. MAQUET, 1987. Deux nouveaux indices chimique et diatomique de qualité d'eau courante. Application au Samson et à ses affluents (bassin de la Meuse belge). Comparaison avec d'autres indices chimiques, biocénétiques et diatomiques. Institut Royal des Sciences naturelles de Belgique, Document de travail 38, 113 p.
- LIEBMANN H., 1958. Handbuch der Frischwasser- und Abwasserbiologie. Biologie des Trinkwassers, Badewassers, Frischwassers, Vorfluters und Abwassers. Band 1. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 640 S.
- ROUND F. E., 1981. The ecology of algae. Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge : 1-629.
- RUMEAU A. et M. COSTE, 1988. Initiation à la systématique des Diatomées d'eau douce. Pour l'utilisation pratique d'un indice diatomique générique. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* **309** : 1-69.
- SLÀDEČEK V., 1973. System of water quality from the biological point of view. *Arch. Hydrobiol.*, Beih. **7** (1-4) : 1-218.
- STRAUB F., 1982. Diatomées épilithiques de six lacs du Jura suisse : premiers résultats. C.R. 4^e coll. ADLAF. *Crypto. : Algol.* **3** (4) : p. 347.
- STRAUB F., 1989. Application de l'écologie des diatomées littorales de lacs carbonatés à la reconstitution des environnements préhistoriques d'un site archéologique. Hauterive-Champréveyres (lac de Neuchâtel). Thèse, Université de Neuchâtel, 88 et 207 p.
- VAN DAM H., 1979. Diatoms and water quality in lowland streams in the province of Northern Brabant (The Netherlands). *Hydrobiol. Bull. Amsterdam.* **13** (1) : 13-21.
- VAN DAM H., A. MERTENS & J. SINKELDAM, 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology.* **28** (1) : 117-133.
- WUTHRICH M., 1960. Les Diatomées du lac de Neuchâtel. *Bull. Soc. Neuchâteloise Sci. Nat.* **83** : 7-40.
- WUTHRICH M., 1975. Les Diatomées. Contribution à la connaissance de la flore algologique du Parc National Suisse. *Ergebn. wiss. Untersuch. Schweiz. Nat. Park.* **14** (72) : 273-369.

Reçu le 4 novembre 1994; received November 4, 1994
 Accepté le 5 janvier 1995; accepted January 5, 1995

THE EFFECTS OF SALINITY, LIGHT AND TEMPERATURE ON *GYROSIGMA* SPP.

G. REID

Department of Botany, The Natural History Museum, Cromwell Road, London, England

GYROSIGMA
TEMPERATURE
SALINITY
CULTURE

ABSTRACT – The edaphic *Gyrosigma* populations of two salt marshes on the Isle of Sheppey, Kent, England, are being investigated. Stations along transects (one per marsh) are being sampled on a quarterly basis of quantitative estimates of the *Gyrosigma* populations. Concurrent field measurements of salinity, temperature and pH are taken at each station. Floristic changes along transects and between the two marshes will be described, in relation to changes in the physico-chemical environment. Preliminary results of culture work on *Gyrosigma fasciola* will be presented.

GYROSIGMA
TEMPÉRATURE
SALINITÉ
CULTURE

RÉSUMÉ – Deux populations édaphiques de *Gyrosigma* sont étudiées dans les marais salants de l'île de Sheppey, Kent, U.K. Des stations réparties le long de transects (un par marécage) sont échantillonnées tous les trois mois pour obtenir une estimation quantitative des populations de *Gyrosigma*. La salinité, la température et le pH sont mesurés simultanément à chaque station. Les changements floristiques le long de chaque transect et pour les deux marécages sont décrits en relation avec les changements physico-chimiques de l'environnement. Les résultats préliminaires concernant des expériences de mise en culture de *G. fasciola* sont présentés.

INTRODUCTION

Salt marshes are subject to periodic flooding by the sea and as such the dominant feature in any salt marsh is the fluctuating salinity and temperature regime. The diatoms in the marsh are submerged by the tide, but on retreat of the tide are exposed to increasing salinity due to evaporation from the surface of the pans, or to decreasing salinity due to freshwater inputs from rainwater and land run-off. Diatoms are also exposed to wide thermal fluctuations as the temperature in shallow pans and on exposed sediments may rise by several degrees centigrade on a warm day.

An investigation into the ecological tolerances and morphological variability of salt marsh Gyrosigmataceae, was initiated. The taxonomy of the sigmoid naviculaceae (*Gyrosigma* and *Pleurosigma*) is in a state of flux with the specific limits of the genera being in dispute and the stability of the various diagnostic features of the valve being disputed (Stidolph 1988, Cardinal 1989, Sterrenburg 1990). Culturing taxa under different salinities, temperature and light regimes allows growth rates and valve morphology to be monitored under known controlled conditions. An understanding of

the plasticity and/or stability of morphological features of the cells is essential to good taxonomy. This has already been illustrated by Syvertsen's (1979) study which showed that *Thalassiosira gravis* Cleve and *T. rotula* Meunier were temperature-specific expressions of the same species. Culture work also permits the determination of size-dependent shape variation, using different-sized cells of the same species (Cox 1983).

MATERIALS & METHODS

All samples were taken from two salt marshes on the Isle of Sheppey, Kent (Diagram 1). The marshes are situated on the south bank of the mouth of the River Thames and both are south facing. The two experimental marshes vary quite markedly in their topographic features. Marsh A is a very young salt marsh system with shallow pans and not very notable channels. The marsh is composed of a very soft fine sediment from station 3 to 8. Marsh B is a much firmer under foot and resembles station 1 of marsh A in its topographic features in that throughout the marsh it consists of well formed pans and deep channels. Samples from exposed and submerged stations (Table I) were collected by pressing a plastic drain pipe (3 cm in diameter), 1 cm

into the marsh sediment. If water depth was too great to permit this, samples were taken by drawing a plastic tube across the surface of the sediment so that a mixture of sediment and water from the same surface area as that collected from the core (Round 1953) was obtained. Three replicates were taken at each site. Temperature, salinity, pH and mv were measured at each site using a Jenway 3070 pH meter.

Table I. – Position of the stations in the two sites and specific descriptions with respect to physical and chemical environment.

Marsh A : The Swale TR030662

Station	Description
1	Top of marsh. Large salt pan
2	Interface between salt marsh proper and upper marsh.
3	Middle marsh pan.
4	Middle marsh surface mud from within vegetation.
5	Bottom of marsh, pan.
6	Bottom of marsh, channel at interface of mud flats and salt marsh
7	Channel, in mud flats.
8	Surface mud, low tide.

Marsh B : Harty Ferry Inn TR015665

Station	Description
9	Top of marsh, large pan.
10	Middle of marsh, deep channel.
11	Middle of marsh, small pan.
12	Bottom of marsh, small pan.
13	Bottom of marsh, deep channel.
14	Interface of mud flats and salt marsh.
15	Surface mud, low tide.

A small proportion of the sediment was weighed fresh and then dried in an oven overnight and reweighed to obtain the water content of the site.

The sediment samples were placed in Petri dishes and the living diatoms separated from the sediments using the lens tissue technique (Eaton & Moss 1966), fixed in Lugol's iodine, to count "live" cells. Only cells with well preserved chloroplasts were counted. These were presumed to represent the actively growing population at the moment of sampling.

Rough cultures were established in Petri dishes in GezS media (Reid & Cox submitted). Unialgal cultures of *Gyrosigma* were established from the rough cultures using a fine capillary tube. The cultures were subjected to different salinities and light/temperature regimes (i.e. multifactorial design : salinity x light x temperature. Salinity 0, 7, 14, 21, 28, 35, 42 ppt., Temperature 5-25°C, light intensity 8-45 $\mu\text{Em}^{-2}\text{sec}^{-1}$).

RESULTS

Field Results

The temperature profiles over the two marsh systems show seasonal variation (Fig. 1). Temperature variation along marsh system A shows the widest fluctuation in temperature, whereas the fluctuation along marsh B is relatively small.

The salinity profile for the two marshes does not show such a clear seasonality (Fig. 1). There is wider fluctuation in salinity along the marsh A profile. At both marshes the greatest fluctuation occurs in the middle of the marsh, stations 2-4 and 10-12. Water content is a significantly variable factor with wide fluctuation occurring between the replicates at each station and throughout the marshes (Fig. 1).

There is a significant difference in species composition between and within the stations along the marshes ($F > 0.05$). *Gyrosigma fasciola* has maximum cell densities at salinities of 22 parts per thousand and 10°C. It is mainly restricted to the winter months although it does occur in low numbers throughout the year, distribution range : middle to bottom of marsh, both systems.

Gyrosigma spenceri has maximum cell densities at 32 ppt showing a normal distribution within the salinity range 20-56 ppt. It occurs throughout the year with maximum numbers in the middle of the marsh (marsh A, station 4).

Gyrosigma balticum occurs mainly during the summer period with temperatures of 20°C and salinity 32 ppt, restricted mainly to the bottom of the marsh (marsh A, station 7).

Gyrosigma litorale occurs all the year round and is restricted to the middle/bottom of marsh zone, occurring in maximum numbers at station 13, 1.12.1993, 30 ppt and 6°C.

Culture work on *G. fasciola*

Gyrosigma fasciola has died at salinities above 35 ppt; its maximum growth occurred at 21 ppt (Fig. 2). At lower salinities slight distortion in valve outline was observed.

DISCUSSION

The distribution of the edaphic diatoms is very sporadic, showing both inter- and intra-site variation in species composition and density. *G. balticum* shows an interesting seasonal pattern; it persists as isolated individuals throughout the year (Carter 1932), but with a maximum under parti-

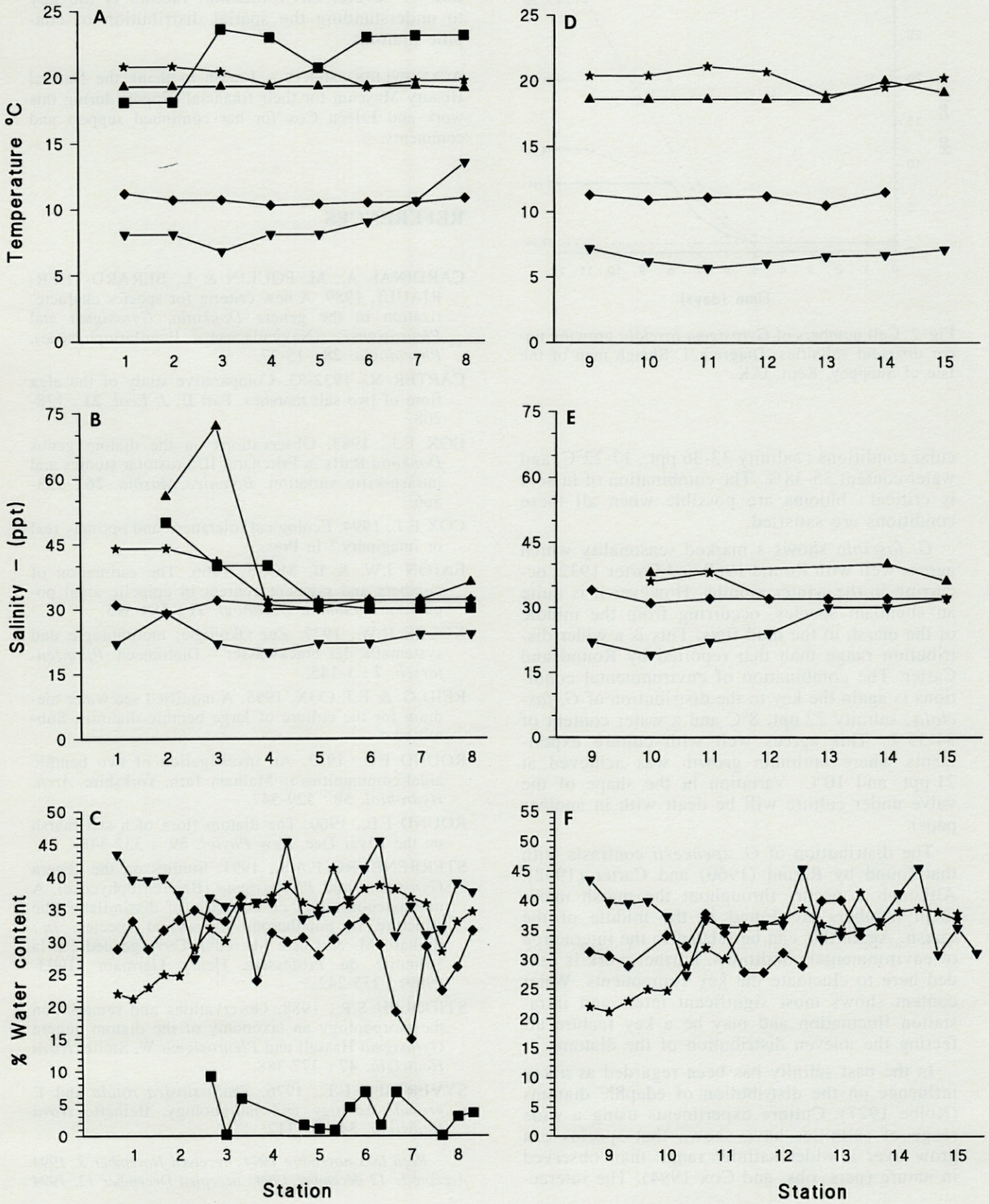


Fig. 1. Graph showing variation in temperatures, salinity and water content between sites in the two salt marsh systems on different occasions; A – C marsh A; D – F marsh B.
 ■ 4.7.1993, ▲ 14.8.1993, ▼ 1.12.1993, ◆ 15.3.1993, * 26.7.1994.

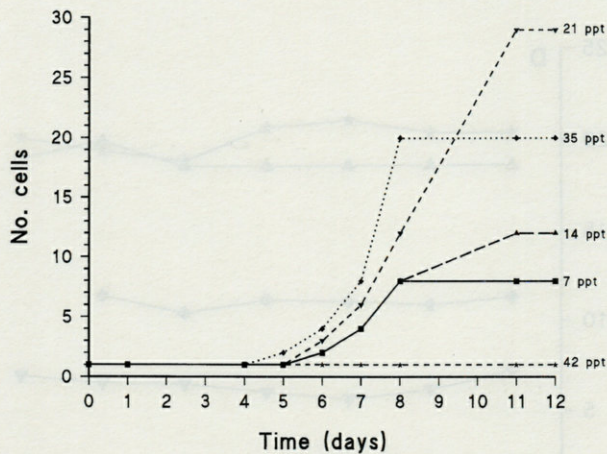


Fig. 2. Cell numbers of *Gyrosigma fasciola* growing under different salinities. Diagram 1. Sketch map of the Isle of Sheppey, Kent, U.K.

cular conditions : salinity 32-36 ppt., 17-22°C, and water content 35-38%. The combination of factors is critical : blooms are possible when all these conditions are satisfied.

G. fasciola shows a marked seasonality which agrees well with Round 1960 and Carter 1932, occurring in the winter months. However it is quite an abundant species, occurring from the middle of the marsh to the mud flats. This is a wider distribution range than that reported by Round and Carter. The combination of environmental conditions is again the key to the distribution of *G. fasciola*; salinity 22 ppt, 8°C and a water content of 34-35%. This agrees well with culture experiments where optimum growth was achieved at 21 ppt. and 10°C. Variation in the shape of the valve under culture will be dealt with in another paper.

The distribution of *G. spencerii* contrasts with that found by Round (1960) and Carter (1932). Although it occurs throughout the marsh maximum numbers are found in the middle of the marsh. Again this can be related to the interaction of environmental conditions. Further work is needed here to elucidate the key components. Water content shows most significant inter- and intra-station fluctuation and may be a key feature affecting the uneven distribution of the diatoms.

In the past salinity has been regarded as a key influence on the distribution of edaphic diatoms (Kolbe 1927). Culture experiments using a wide range of salinities have shown that species can grow over a wider salinity range than observed in nature (pers. obs. and Cox 1994). The interac-

tion of several environmental factors is the key to understanding the spatial distribution of edaphic diatoms.

ACKNOWLEDGEMENTS – I wish to thank the Natural History Museum for their financial support during this work and Eileen Cox for her continued support and comments.

REFERENCES

- CARDINAL A., M. POULIN & L. BERARD-THERIAULT, 1989. A new criteria for species characterization in the genera *Donkinia*, *Gyrosigma* and *Pleurosigma* (Naviculaceae, Bacillariophyceae). *Phycologia*. **28** : 15-27.
- CARTER N., 1932-33. Comparative study of the alga flora of two salt marshes. Part II. *J. Ecol.* **21** : 128-208.
- COX E.J., 1983. Observations on the diatom genus *Donkinia* Ralfs in Pritchard. II. Frustular studies and intraspecific variation. *Botanica Marina*. **26** : 553-566.
- COX E.J., 1994. Ecological tolerances and optima—real or imaginary? In Press.
- EATON J.W. & B. MOSS, 1966. The estimation of numbers and pigment content in epipelagic algal populations. *Limnol. Oceanogr.* **11** : 584-595.
- KOLBE R.W., 1927. Zur Ökologie, morphologie und systematik der brackwasser – Diatomeen. *Pflanzenforsch.* **7** : 1-145.
- REID G. & E.J. COX, 1995. A modified sea water medium for the culture of large benthic diatoms. Submitted.
- ROUND F.E., 1953. An investigation of two benthic algal communities in Malham Tarn, Yorkshire. *Arch. Hydrobiol.* **50** : 529-547.
- ROUND F.E., 1960. The diatom flora of a salt marsh on the River Dee. *New Phytol.* **59** : 332-348.
- STERRENBURG F.A.S., 1991. Studies on the genera *Gyrosigma* and *Pleurosigma* (Bacillariophyceae). A new phenomenon : co-existence of dissimilar raphe structure in populations of several species. In : Rickard M. & Coste M. (eds). Ouvrage dédié à la Mémoire du Professeur Henry Germain (1903-1989) : 235-242.
- STIDOLPH S.R., 1988. Observations and remarks on the morphology and taxonomy of the diatom genera *Gyrosigma* Hassall and *Pleurosigma* W. Smith. *Nova Hedwigia*. **47** : 377-388.
- SYVERTSEN E.E., 1976. *Thalassiosira rotula* and *T. graviga* ecology and morphology. Beihefte *Nova Hedwigia*. **54** : 99-112.

Reçu le 3 novembre 1994; received November 3, 1994
 Accepté le 12 décembre 1994; accepted December 12, 1994

EFFETS DES MÉTAUX LOURDS (Cd, Hg) SUR LES COMMUNAUTÉS DE DIATOMÉES PÉRIPHYTIQUES DÉVELOPPÉES SUR SUBSTRATS ARTIFICIELS EN MICROCOSMES

*Effects of heavy metals (Cd, Hg) on periphytic diatom communities
using artificial substrates in microcosms*

F. PÉRES¹, M. COSTE², M. RICARD¹, A. BOUDOU³, F. RIBEYRE³

¹Université Michel de Montaigne – Bordeaux 3 – CRIAM Domaine Universitaire F-33405 Talence, France

²Cemagref Groupement de Bordeaux, 50 avenue de Verdun, F-33610 Cestas, France

³Université de Bordeaux I, Laboratoire d'Ecotoxicologie/CNRS, av. des Facultés, F-33405 Talence, France

ECOTOXICOLOGIE AQUATIQUE
MICROCOSMES
MÉTAUX LOURDS
PÉRIPHYTON
DIATOMÉES

RÉSUMÉ – Les effets toxiques de deux métaux (Cadmium et Mercure – sous la forme méthylmercure) sont étudiés sur le compartiment périphytique de systèmes expérimentaux associant un biotope mixte : colonne d'eau – sédiment naturel et une biocénose réduite comportant différentes espèces aquatiques animales et végétales. Les protocoles d'expérimentation permettent d'étudier différentes conditions de contamination mettant en jeu la nature, la concentration des métaux lourds et leurs sites d'apport (colonne d'eau ou sédiment) en conditions contrôlées (température, photopériode, intensité lumineuse et pH). Le périphyton composé essentiellement de Diatomées, a été échantillonné sur substrat artificiel (lame de verre), et deux durées de colonisation ont été retenues : 30 jours (t1) et 72 jours (t2). Les perturbations qualitatives et quantitatives du périphyton, sont analysées en terme de structure de peuplement, densité de population et cinétique de colonisation. Près de 150 espèces ont été recensées et une confrontation de leurs caractéristiques écologiques puisées dans la littérature scientifique, permet de discuter l'évolution de leur distribution au cours des expérimentations. Les taxons considérés comme saprophytes voire halophiles dans les milieux naturels sont apparus parmi les plus résistants dans les unités expérimentales contaminées.

AQUATIC ECOTOXICOLOGY
MICROCOSMS
HEAVY METALS
PÉRIPHYTON
BACILLARIOPHYCEAE

ABSTRACT – The toxic effects of two metals (cadmium and mercury, as methylmercury) were studied on the periphytic compartment of experimental systems in association with a biotope made of two components – water column / natural sediment – containing different aquatic species (plants, molluscs). Different conditions of contamination were studied in the protocols of the experiment with special attention given to the levels of exposure (several concentrations) and the initial source of contamination (water column or sediment). The equipment available enabled the measurement and control of the main environmental factors : temperature, photoperiod, luminous intensity, pH. The periphyton, essentially composed of diatoms, was allowed to grow on artificial substrata (glass slides) then collected after two periods of experimentation, 30 days (t1) and 72 days (t2). The disturbance generated on the periphyton by the contaminants is analysed in terms of population structure, density of population and the dynamics of evolution of the communities according to the condition under study (nature of the contaminants, concentration, contamination sources). During the experimentation, about 150 taxa were identified. Some of them, which are particularly interesting are here described.

I. INTRODUCTION

Dès les années soixante, la contamination des eaux de la baie de Minamata au Japon par le méthylmercure illustra de façon tragique, le phénomène d'augmentation des métaux lourds à l'intérieur de la chaîne alimentaire. La diffusion de ces polluants est généralement examinée en terme de transfert, bioaccumulation, bioamplification (Boudou & Ribeyre 1993), ou encore de biodisponibilité (Andres 1994; Robbe *et al.*, 1985). Dans les milieux continentaux, qui présentent parfois des concentrations excessives en métaux lourds (Latouche *et al.*, 1989), les effets sont appréhendés en laboratoire par des tests physiologiques, éthologiques, génétiques ou biochimiques réalisés sur des individus isolés ou des cultures monospécifiques. L'examen du comportement des communautés est moins fréquemment abordé par les écotoxicologues en raison des difficultés expérimentales et de la lourdeur des protocoles qu'il implique.

Les Algues représentent une composante importante de l'écosystème aquatique d'abord comme producteurs primaires (Wetzel 1964; Goldsborough 1986) mais aussi par leur rôle dans les processus de bioaccumulation des polluants et de transfert vers des niveaux trophiques supérieurs (Wilde & Bennemann 1993). Toute altération de ces organismes aura donc des répercussions sur la chaîne alimentaire (Patrick 1978). Les Diatomées périphytiques, prédominantes dans les milieux lotiques, constituent par leur grande diversité et leur aptitude à se développer dans des conditions les plus extrêmes, un matériel de choix pour l'appréhension des effets des polluants. Ces dernières décennies ont vu se développer, en milieu naturel, de nombreuses méthodes globales (indices biotiques ou diatomiques) qui tentent de traduire le niveau de qualité ou de dégradation de l'eau (Descy & Coste 1979; Round 1991; Coste *et al.*, 1991). Ces méthodes s'appuient essentiellement sur des classements empiriques des espèces établis en fonction de leur sensibilité ou résistance voire de leur affinité pour les polluants, exprimée de façon chiffrée.

L'approche écotoxicologique apporte une possibilité d'intercalibration ou de vérification de l'expression de cette sensibilité globale et peut contribuer en retour à une hiérarchisation plus rigoureuse des taxons utilisés.

Cette étude avait pour objet de mettre en évidence l'impact de deux métaux (Cd et Hg) sur les communautés périphytiques développées sur substrats immergés. Les réponses d'assemblages de Diatomées à ces contaminants avec prise en compte de l'aspect systématique ont rarement été examinées en conditions contrôlées.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dispositif expérimental

L'étude est réalisée dans des unités expérimentales d'un volume de 3 litres alimentées par l'eau du réseau préalablement déchlorée. Chaque microcosme associe un biotope mixte, colonne d'eau et sédiment naturel, peuplé de plantes et Mollusques aquatiques, l'ensemble constituant un écosystème simplifié.

Les Mollusques, (*Corbicula fluminea*), signalés en France dès 1977 (Mouthon, 1981), ont été récoltés dans la Garonne. Ils sont élevés au laboratoire et mis en stabulation dans le même aquarium avant d'être utilisés dans l'expérimentation.

Les macrophytes, *Elodea densa*, choisies pour des raisons pratiques (résistance aux conditions de laboratoire, croissance rapide...) proviennent toutes d'un même lot acheté à un fournisseur et l'origine géographique de ces macrophytes est variable.

Les Diatomées récoltées sur les lames de verre sont apportées par le sédiment naturel et par les macrophytes (Algues épiphytiques).

Les unités expérimentales ainsi définies, sont maintenues à une température de 20°C et soumises à une photopériode de 12 h d'éclairement par jour pendant toute la durée de l'expérience : 30 j (t1) et 72 j (t2).

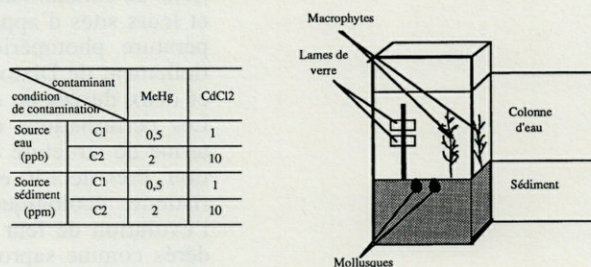


Fig. 1. – Schéma d'une unité expérimentale.

Tabl. 1. – Concentrations en métaux lourds.

contaminant		MeHg	CdCl2
condition de contamination			
Source eau (ppb)	C1	0,5	1
	C2	2	10
Source sédiment (ppm)	C1	0,5	1
	C2	2	10

Conditions de contamination

Les métaux peuvent être apportés dans les unités expérimentales soit directement dans la colonne d'eau, soit à l'intérieur du compartiment sédimentaire. Le choix des concentrations est résumé dans le tableau I.

Pour chaque condition, 2 microcosmes « identiques » ont été réalisés et les résultats présentés concernent les moyennes entre ces 2 répétitions.

Techniques de dosage des métaux lourds

Le mercure total est dosé par Spectrométrie d'Absorption Atomique Sans Flamme (SAASF) selon la méthode décrite par Odin, 1991. La limite de détection de la méthode est de 0.1 ppb.

Le Cadmium est dosé dans les échantillons d'eau par spectrométrie d'absorption atomique, selon la méthode décrite par Inza, 1993. La limite de détection du dosage est de 0.25 ppb.

Les ajouts des contaminants dans les unités expérimentales ont été effectués quotidiennement pour la « source eau », ceci afin de maintenir la concentration au niveau choisi. Pour la « source sédiment », l'ajout des polluants au sédiment a été réalisé au début de l'expérience (t_0) uniquement.

Les dosages sont effectués 3 fois/semaine pour la « source eau ». Pour la « source sédiment » les dosages de l'eau indiquent que les concentrations sont au-dessous de la limite de détection.

Étude du périphyton

Échantillonnage

Le périphyton est collecté sur des lames de verre, après grattage de la totalité de la surface et mise en suspension dans un volume donné d'eau formolée. Ce type de substrat est utilisé par de nombreux auteurs tant en milieu naturel (Acs 1993; Capblancq & Cassan 1979; Watanabe 1985), qu'en laboratoire pour des expérimentations en microcosmes et mésocosmes (Kuiper 1981; Hürlimann & Schanz 1993).

Numérations cellulaires

Pour chaque échantillon, la densité de Diatomées est estimée à l'aide de cellules de comptage, de type Naegotte, et exprimée en nombre de cellules par unité de surface. Les échantillons sont traités à l'eau oxygénée afin d'éliminer la matière organique et rendre apparent

le frustule siliceux qui sert de base à l'identification, puis rincés plusieurs fois à l'eau distillée avant d'être montés entre lame et lamelle dans une résine réfringente (Naphrax). 500 valves sont ainsi déterminées au niveau spécifique ou infraspécifique en microscopie photonique dans le but d'estimer l'abondance relative de chaque taxon. L'identification a fait appel aux ouvrages les plus récents de la Süßwasserflora (Krammer & Lange-Bertalot 1986-1991) et a parfois nécessité des observations en microscopie électronique à transmission (Jeol 100 S).

Des mesures préalables de cinétique de colonisation, dans les mêmes conditions expérimentales, ont conduit à retenir deux temps de prélèvement pour récolter et analyser le périphyton : $t^1 = t^0 + 30$ j et $t^2 = t^0 + 72$ j.

III. RÉSULTATS

Effets des métaux sur la densité de Diatomées

Méthylmercure

Lorsque l'apport est effectué dans la colonne d'eau, la densité cellulaire est réduite d'un facteur 2 dès 0,5 ppb et devient très faible pour une concentration en MeHg de 2 ppb, quelle que soit la durée de l'expérimentation, 30 j (t_1) ou 72 j (t_2) (Fig. 1A).

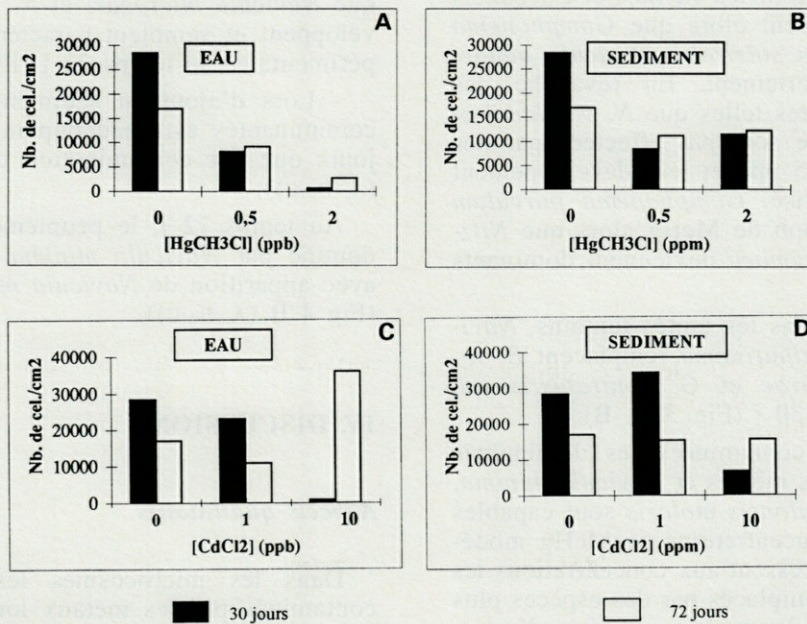


Fig. 2. – Evolution de la densité de Diatomées en fonction A, de la concentration dans l'eau en Me Hg (ppb); B, de la densité de Diatomées en fonction de la concentration « sédimentaire » en Me Hg (ppm); C, de la concentration dans l'eau en Cd (ppb); D, de la concentration « sédimentaire » en Cd (ppm).

Evolution of the diatom density as a function of A, Hg (ppb) water concentration; B, Hg (ppm) sediment concentration; C, Cd (ppb) water concentration; D, Cd (ppm) sediment concentration.

La contamination du sédiment n'affecte la densité des Diatomées qu'à 30 j et de manière moindre que précédemment (Fig. 1B).

Cadmium

Après contamination de la colonne d'eau, la densité des Diatomées diminue au temps 30 jours, et devient fortement réduite à 10 ppb. En revanche, au temps 72 j, la densité de Diatomées augmente dans les unités les plus contaminées (Fig. 1C).

L'apport de cadmium au sédiment entraîne des modifications beaucoup plus atténuées : réduction de la densité de Diatomées seulement à 30 j (Fig. 1D), et accroissement à 72 j, avec sélection des espèces résistantes aux concentrations les plus élevées.

Les témoins, bien colonisés à 30 j, voient leur densité cellulaire diminuer à 72 j vraisemblablement par suite d'un appauvrissement en nutriments (Fig. 2B à D).

Effets sur la structure du peuplement

Méthylmercure

A 30 j, l'apport de méthylmercure dans la colonne d'eau entraîne une régression et une disparition progressives des taxons (Fig. 2A, D, E). Ainsi, dès 0,5 ppb, *Melosira varians* et *Cocconeis placentula* disparaissent alors que *Gomphonema contraturris*, *Eunotia soleirolii*, *Navicula aquaedurae* régressent fortement. En revanche, les formes plus résistantes telles que *N. vandamii* et *Caloneis molaris*, ne sont pas affectées par des concentrations de 0,5 ppb et leur développement semble même favorisé. *Gomphonema parvulum* supporte jusqu'à 2 ppb de MeHg alors que *Nitzschia palea* et *N. pygmaea* deviennent dominants (Fig. 3 A, D, E).

Au temps 72 j, dans les unités témoins, *Navicula minima* et *A. minutissima* remplacent *E. soleirolii*, *N. aquaedurae* et *G. contraturris* qui étaient dominants à 30 j (Fig. 3 A, B).

Dans les unités contaminées les dominantes sont sensiblement les mêmes et *Navicula minima*, *A. minutissima* et *Caloneis molaris* sont capables de résister à des concentrations en MeHg modérées. Ces taxons régressent aux concentrations les plus fortes et sont remplacés par des espèces plus résistantes telles que *Navicula seminulum*, *N. vandamii*, *Simonsenia delognei*, *Nitzschia palea* et *Navicula pygmaea* (Fig. 3 B (A, D, E)).

L'apport de méthylmercure au sédiment entraîne des effets nettement moins marqués.

Au temps 30 j, les taxons qui s'avéraient les plus sensibles lors de la contamination de l'eau

(*Melosira varians*, *Cocconeis placentula*), ne disparaissent ou régressent qu'aux plus fortes concentrations dans le sédiment alors que l'abondance de *Navicula seminulum* augmente (Fig. 3 A (A, B, C)). A 72 j, les observations sont similaires au cas précédent quelle que soit la concentration avec prédominance de *Navicula seminulum* et persistance de *N. pygmaea* (Fig. 3 B (A, B, C)).

Cadmium

- L'ajout dans la colonne d'eau provoque, à 30 j, une modification importante de la structure du peuplement dès 1 ppb. *Eunotia soleirolii*, *M. varians* et *G. contraturris* régressent tandis que *Cymbella mesiana*, *Navicula minima*, *Nitzschia palea* et *Navicula gregaria* semblent favorisés en particulier dans les unités contaminées.

Navicula aquaedurae et *N. cryptocephala* sont présents aussi bien dans les unités témoins que contaminées (Fig. 4 A (A, D, E)).

A 72 j et dans les unités témoins, *Eunotia soleirolii*, *G. contraturris* et *Navicula aquaedurae* dominants à 30 j régressent au profit de *Navicula minima* et *Achnanthes minutissima*.

E. soleirolii, *G. contraturris* et *C. placentula* sont éliminés à 1 ppb alors que *Navicula minima* et *A. minutissima* restent bien représentés dans les conditions de contamination élevée.

A 10 ppb, *Navicula gregaria* et *Cymbella mesiana*, déjà présents à 30 j, se maintiennent tandis que *Navicula microcari* et *N. monoculata* se développent et semblent caractériser les unités expérimentales au temps 72 j (Fig 4 B (A, D, E)).

- Lors d'ajout au sédiment, la structure des communautés est beaucoup moins affectée à 30 jours que par contamination de l'eau. (Fig. 4 A (A, B, C)).

Au temps 72 j, le peuplement diatomique est dominé par *Navicula minima* et *A. minutissima* avec apparition de *Navicula microcari* à 10 ppm (Fig 4 B (A, B, C)).

IV. DISCUSSION

Aspects quantitatifs

Dans les microcosmes les plus faiblement contaminés par les métaux lourds (Hg 0,5 ppb ; Cd 1 ppb), la densité cellulaire diminue par l'action biocide des métaux lourds et la limitation probable des nutriments disponibles (Fig. 1).

En revanche, dans les milieux fortement contaminés (Hg 0,5 ppb, Cd 10 ppb), après une diminution passagère au temps t1 (30 j), la densité cellulaire, s'accroît à 72 j, en raison de la persis-

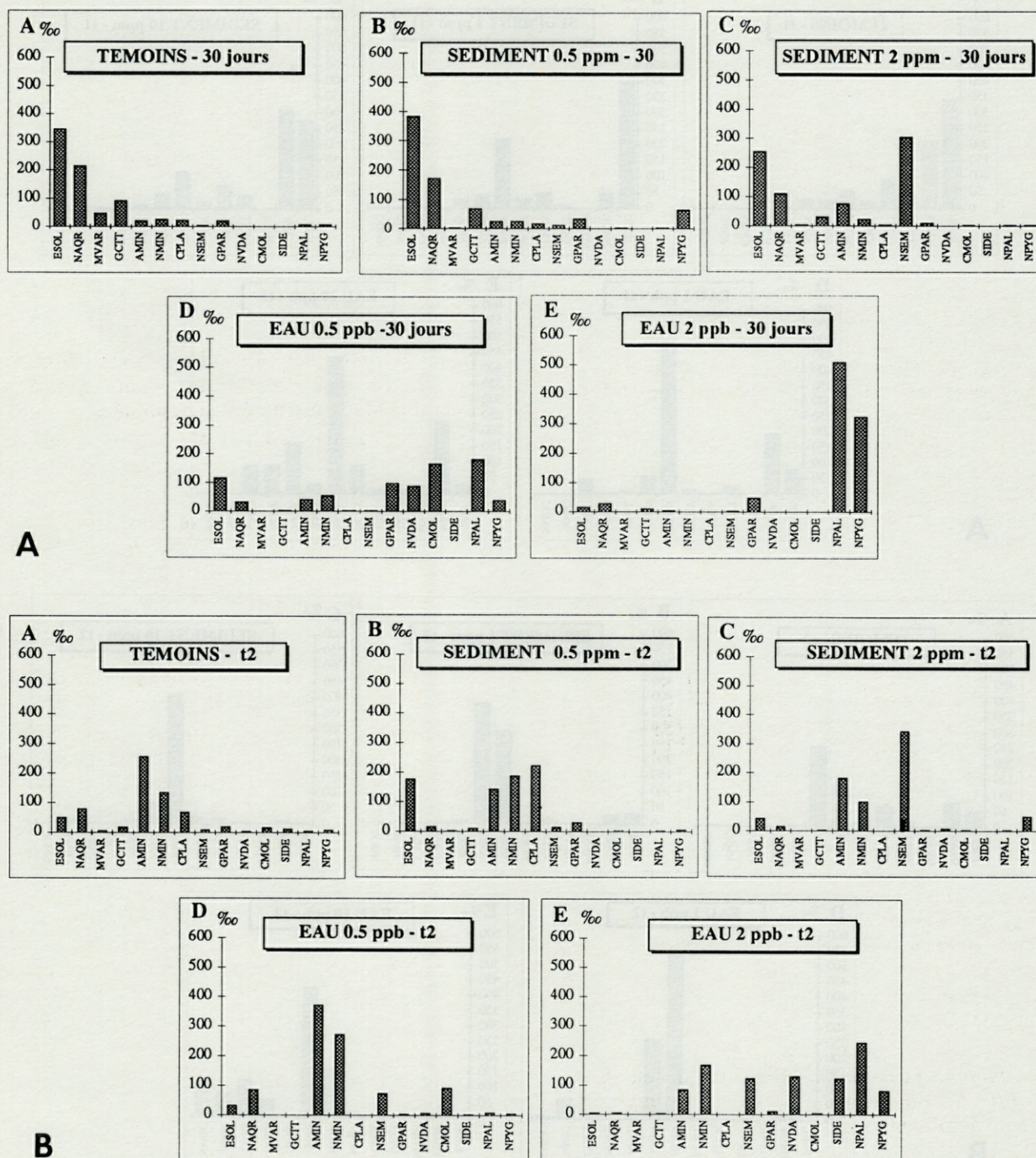


Fig. 3. – A. Evolution de la structure du peuplement au temps t1 en fonction de la concentration en MeHg. AMIN = *Achnanthes minutissima* (Kützing) Grunow; CMES = *Cymbella mesiana* Cholnoky; CMOL = *Caloneis molaris* (Grunow) Krammer; CPLA = *Cocconeis placentula* Ehrenberg; ESOL = *Eunotia soleirolii* (Kützing) Rabenhorst; GCTT = *Gomphonema contraterris* Lange-Bertalot & Reichardt; GPAR = *Gomphonema parvulum* Kützing; MVAR = *Melosira varians* Agardh; NAQR = *Navicula aquaedurae* Lange-Bertalot; NCRY = *N. cryptocephala* Kützing; NMIC = *N. microcari* Lange-Bertalot; NMOC = *N. monoculata* Hustedt; NMIN = *N. minima* Grunow; NGRE = *N. gregaria*; NPAL = *Nitzschia palea*; NPYG = *Navicula pygmaea* Kützing; NSEM = *Navicula seminulum* Grunow; NVDA = *Navicula vandamii* Schoeman & Archibald; SIDE = *Simonsenia delognei* (Grunow) Lange-Bertalot.

B. Evolution de la structure du peuplement au temps t2 en fonction de la concentration en MeHg.

Evolution of the community structure at t1 as a function of the MeHg concentration. B. Evolution of the community structure at t2 as a function of MeHg concentration.

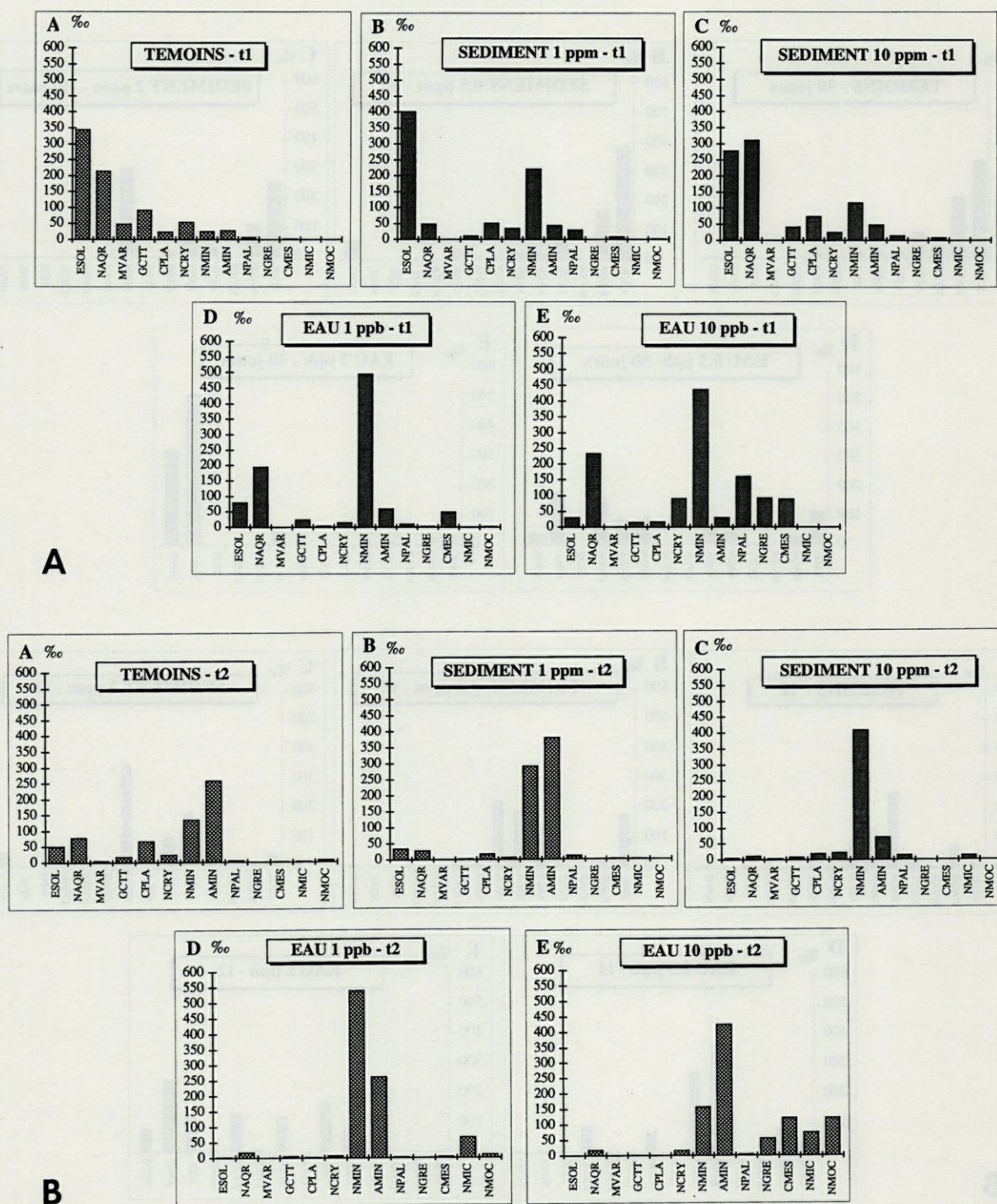


Fig. 4. – A. Evolution de la structure du peuplement au temps t1 en fonction de la concentration en Cd. B. Evolution de la structure du peuplement au temps t2 en fonction de la concentration en Cd.

Evolution of the community structure at t1 as a function of Cd concentration. B. Evolution of the community structure (t2) in relation to Cd concentration.

tance des espèces les plus tolérantes. Ces observations posent le problème du temps de réponse des Diatomées vis à vis des pollutions métalliques. Les taxons résistants sont « sélectionnés »

seulement au bout de 72 j d'expérience. Cette augmentation de la densité de Diatomées indique que les Diatomées présentes dans le milieu conservent la potentialité de se développer mais la colonisa-

tion des substrats est considérablement freinée par une altération des processus de reproduction. De nombreux travaux ont montré que les taux de croissance de ces algues pouvaient être réduits par inhibition de la division cellulaire à des fortes concentrations en métaux (Kuiper 1981; Rachlin *et al.* 1983; Conway *et al.*, 1979).

Aspects qualitatifs

Navicula seminulum, *Navicula vandamii* (Pl. I, Fig. 13, 14, 15), *Simonsenia delognei*, *Caloneis molaris*, *G. parvulum* et surtout *Nitzschia palea* et *Navicula pygmaea*, se développent dans les unités contaminées par le Hg, alors que des taxons plus sensibles comme *Eunotia soleirolii* (Pl. I, Fig. 3, 4), *Cocconeis placentula*, *G. contraturris* (Pl. I, Fig. 1) et *Melosira varians* régressent fortement ou sont éliminés (Fig. 3).

Certaines de ces observations vérifient ce qui est généralement admis dans la littérature. Ainsi, *Navicula seminulum* et *G. parvulum*, taxons N-hétérotrophes facultatifs et connus pour résister à une forte charge organique en milieu naturel sont classés par Lange-Bertalot (1979) parmi les espèces les plus tolérantes à la pollution. *Navicula pygmaea* est définie comme une espèce de milieux eutrophes, à forte conductivité (Van Dam 1994; Hofmann 1994) mais son comportement vis à vis des métaux lourds est peu abordé. *Nitzschia palea*, espèce N-hétérotrophe obligatoire, caractérisant les teneurs élevées en matière organique supporte également de fortes concentrations en métaux. Rushforth (1981) montre que l'abondance de *Nitzschia palea* est corrélée positivement avec les métaux lourds. L'association *Navicula pygmaea*-*Nitzschia palea* est fréquemment dominante dans les retenues d'eau pluviales bordant les autoroutes dont les sédiments sont fortement contaminés par le plomb.

Dans les unités expérimentales contaminées par le Cd, *Cymbella mesiana* (Pl. I, Fig. 1, 2), *Navicula microcari* (Pl. I, Fig. 10, 11, 12), *Navicula monoculata* (Pl. I, Fig. 18, 19, 20, 21), *Navicula gregaria*, *A. minutissima* et *Navicula minima* remplacent les espèces sensibles, *Eunotia soleirolii*, *G. contraturris* et *Cocconeis placentula* (Fig. 4).

Navicula gregaria, *N. monoculata* et *N. minima* sont classées dans le groupe des α -mésosaprobies par Van Dam et Hofmann 1994, ce qui témoigne d'une certaine résistance de ces taxons. En revanche, *Cymbella mesiana* est définie comme une espèce de milieux propres, peu chargés en matière organique et oligotrophes. Sa résistance au Cd pourrait être attribuée à la gaine gélatineuse qui, entourant la cellule, piégerait le Cd et l'empêcherait de pénétrer à l'intérieur. L'écologie de *Navicula microcari* espèce récemment observée dans des eaux à forte conductivité (Israël et îles Canaries), reste mal connue (Lange-Bertalot 1993).

La résistance à certains métaux d'*A. minutissima*, rencontré ici dans les unités expérimentales contaminées, est assez controversée. Certains auteurs montrent que ce taxon est capable de résister aux métaux (Say, 1978; Lindstrom, 1991; Genter *et al.*, 1991), alors que d'autres ont trouvé qu'il était plutôt sensible aux pollutions métalliques (Rushforth, 1981; Besch *et al.*, 1972).

L'écologie de *G. contraturris* et d'*Eunotia soleirolii*, tous deux sensibles au Hg et au Cd n'est pas bien déterminée. La première est une espèce tropicale non encore signalée en France, la seconde appartient à un genre électif des milieux peu pollués, oligotrophes et acides (Van Dam 1994) ce qui conforte nos observations.

Melosira varians et *Cocconeis placentula*, espèces plus ubiquistes que les précédentes ont déjà été décrites comme sensibles à la pollution métallique (Besch *et al.*, 1972; Genter *et al.*, 1987). Les espèces épipéliques (*Nitzschia palea* et *Navicula pygmaea*), résistantes lors d'une contamination par l'eau sont inhibées quand le MeHg est ajouté au sédiment.

Après 72 j et quel que soit le type ou l'intensité de la contamination, les grandes formes (*Eunotia*, *Gomphonema*) disparaissent au profit des plus petites. Cette observation n'est pas sans interférer sur l'estimation des densités (nombre de cellules par unité de surface) qui ne reflète pas réellement les variations de biomasse. Le volume plasmique moyen de *G. contraturris* est par exemple entre 50 à 200 fois supérieur à celui de *Navicula monoculata*. Les tailles relevées pour certaines espèces correspondent souvent à la limite inférieure donnée dans la littérature scientifique. C'est le cas pour *Navicula pygmaea* dont la longueur ne dépasse pas ici 10 microns alors qu'elle peut varier de 10 à 62 mais aussi pour *Navicula monoculata* (identification vérifiée par Lange-Bertalot), qui ne dépasse jamais 5 μm de long alors que ses dimensions oscillent d'après la littérature entre 8 et 22 microns. Des réductions de taille moins nettes sont observées avec *Navicula seminulum*, *N. minima* et *A. minutissima*. La seule espèce encore volumineuse persistant à 72 j avec le cadmium est *Cymbella mesiana* mais sa taille correspond aux plus petites formes décrites dans la Süßwasserflora. Ce phénomène également observé dans les unités témoins est peut être imputable à l'effet de confinement mais une limitation par la silice disponible n'est pas à écarter.

La référence permanente aux données de la littérature scientifique, nécessaire à l'interprétation des modifications des communautés, peut être exprimée de manière numérique par le biais d'indices plus ou moins globaux qu'il nous a paru intéressant de confronter aux résultats de ces premières observations.

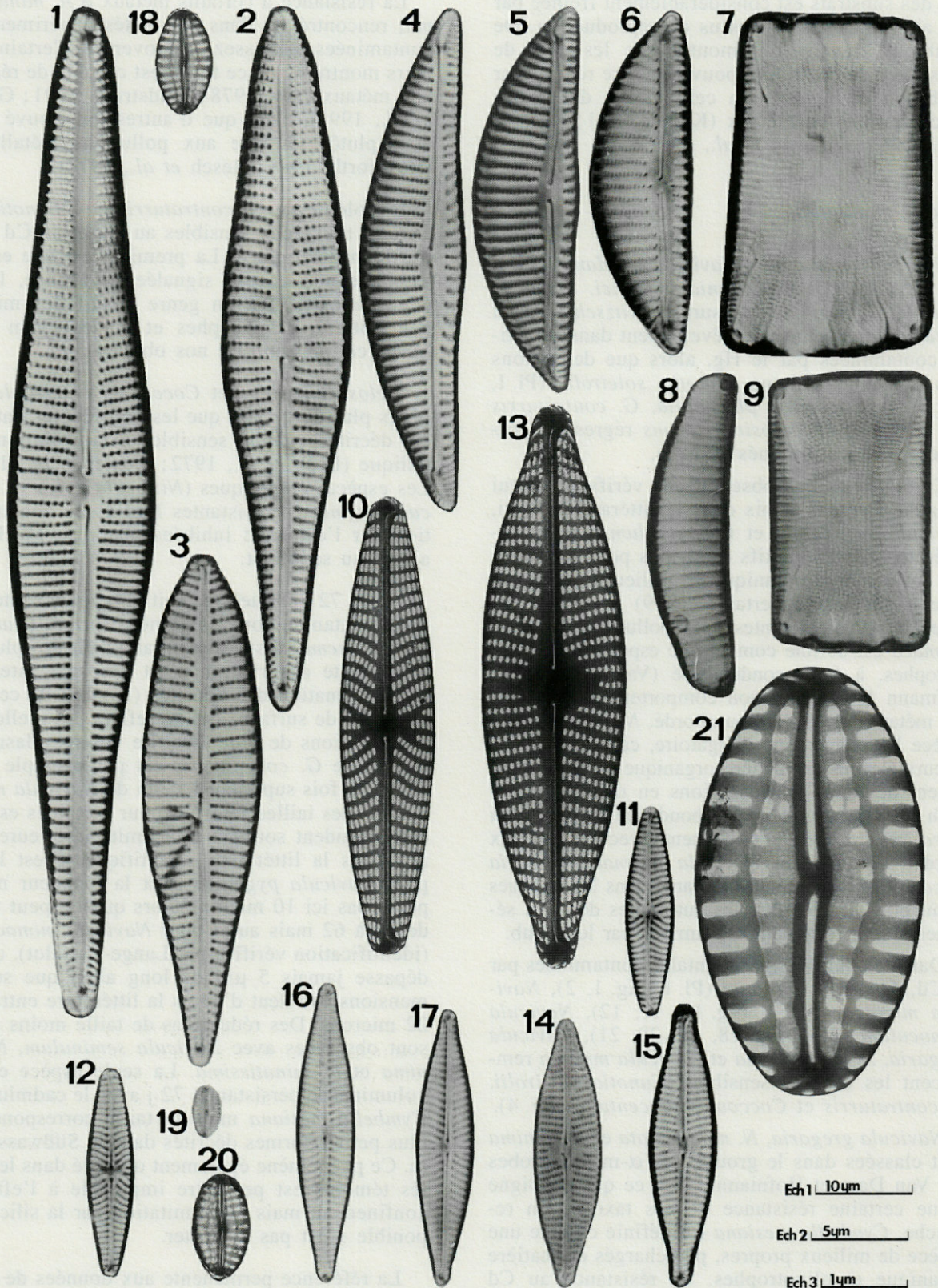


Planche I. – 1 à 3 : Ech 1 – *Gomphonena contraturris* Lange-Bertalot ; 4 à 6 : Ech 1 – *Cymbella mesiana* Cholnosky ; 7 et 9 : Ech 1 – *Eunotia soleirolii* (Kützing) Rabenhorst vue connective ; 8 : Ech 1 – *Eunotia soleirolii* (Kützing) Rabenhorst vue valvaire ; 10 : Ech 2 – *Navicula microcari* Lange-Bertalot ; 11 et 12 : Ech 1 – *Navicula microcari* Lange-Bertalot ; 13 : Ech 2 – *Navicula vandamii* Schoeman & Archibald ; 14 et 15 : Ech 1 – *Navicula vandamii* Schoeman & Archibald ; 16 et 17 : Ech 1 – *Navicula aquaedurae* Lange-Bertalot ; 18 et 20 : Ech 2 – *Navicula monoculata* Hustedt ; 19 : Ech 1 – *Navicula monoculata* Hustedt ; 21 : Ech 3 – *Navicula monoculata* Hustedt. Electronmicrographie réalisée au centre de microscopie électronique de Bordeaux I (Talence).

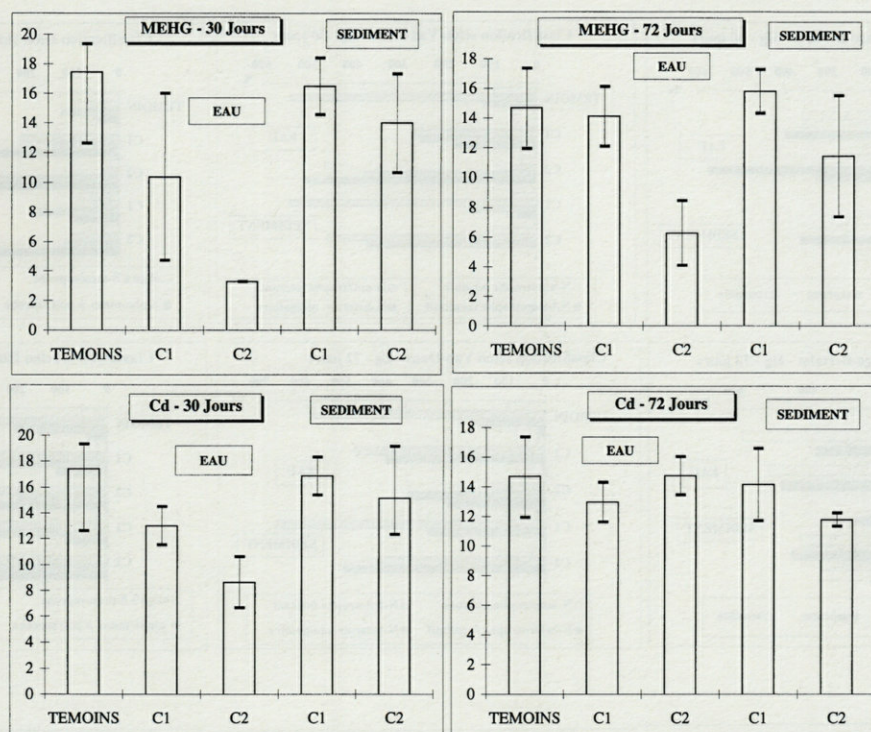


Fig. 5. – Evolution de l'IPS dans le temps et en fonction des concentrations en métaux.

Evolution of IPS in time and in relation to metal concentration.

Confrontation des résultats à quelques indices diatomiques

Les méthodes testées ici sont soit des indices de qualité globale fondés sur la pondération abondance-sensibilité spécifique (ex indice de pollu-sensibilité spécifique IPS du Cemagref, 1982) soit des compilations automatisées de bases écologiques codifiées telles que celles proposées par Van Dam ou Hofmann (1994).

Indépendamment de la durée d'exposition (t1 ou t2), l'application de l'IPS traduit de façon satisfaisante la pollution mercurique des unités expérimentales contaminées à partir de la colonne d'eau et confirme l'atténuation des effets observés lors d'inoculation du sédiment (Fig. 5).

Avec le cadmium, la chute de qualité exprimée par l'indice n'est visible qu'au temps t1. Au bout de 72 j la prédominance de *Cymbella mesiana* taxon considéré en milieu naturel comme sensible ne permet pas de confirmer la contamination. Cette espèce du sous-genre *Encyonema* se développe en tubes muqueux susceptibles de gêner la diffusion du métal.

L'extraction des caractéristiques écologiques fait appel aux classifications proposées par Lange-Bertalot (1979), Cholnoky (1968), Van Dam (1994) et Hofmann (1994).

Lange-Bertalot distingue 3 grands groupes d'espèces « différentielles » selon leur sensibilité ou leur tolérance aux pollutions mixtes. Cholnoky puis Van Dam utilisent la capacité d'hétérotrophie des espèces vis-à-vis de l'azote organique (notion contestée par l'auteur précédent). Hofmann classe 488 taxons en fonction de leurs affinités pour les matières organiques dissoutes en utilisant la nomenclature du système des saprobies.

Les résultats d'application de ces méthodes sont obtenus par cumul des abondances relatives à l'intérieur des classes définies par les auteurs précités. Le pourcentage des espèces non répertoriées dans ces systèmes, qui peut être élevé, n'est pas représenté sur les graphes (Fig. 11-12).

Quelle que soit la durée d'exposition (30 et 72 j), ces méthodes traduisent la pollution par le mercure qui favorise les groupes d'espèces les plus tolérantes aux pollutions ou hétérotrophes vis à vis de l'azote. En revanche, comme avec l'IPS, ces classifications ne rendent pas compte de la pollution cadmique de manière aussi significative pour les raisons déjà évoquées.

Dans le sédiment, l'examen de l'évolution des exigences autécologiques permet une meilleure appréhension des contaminations que celle obtenue avec un indice global (IPS) qui est une moyenne pondérée abondance-classe.

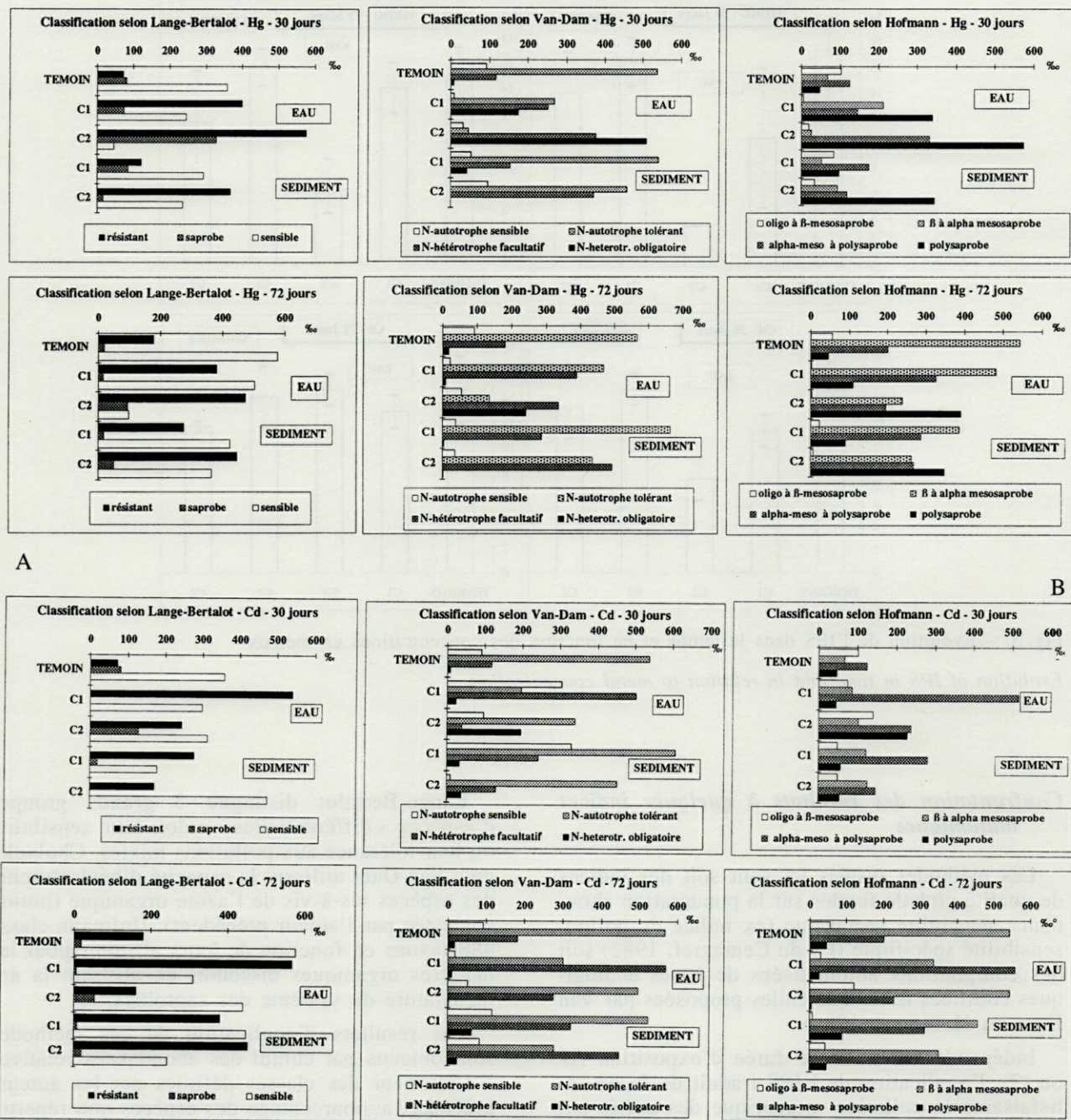


Fig. 6. – A, Classification des espèces selon Lange-Bertalot, Van Dam et Hofmann en fonction de la concentration en Hg. B, Classification des espèces selon Lange-Bertalot, Van Dam et Hofmann en fonction de la concentration en Cd. A, Classification of the species after Lange-Bertalot, Van Dam and Hofmann as a function of Hg concentration. B, Classification of the species after Lange-Bertalot, Van Dam and Hofmann as a function of Cd concentration.

Cette approche souligne s'il en était besoin la complexité des mécanismes de diffusion des polluants dans les milieux testés ou au niveau cellulaire.

Les indices biologiques restent particulièrement réducteurs et les classifications d'espèces issues

de la littérature souvent très incomplètes ou dépendantes de jeux de données restreints. Ils offrent néanmoins l'avantage d'une complémentarité certaine, en illustrant l'évolution des communautés après contamination et en contribuant à une meilleure connaissance des réponses des espèces sélectionnées.

CONCLUSION

Les résultats de ces premières investigations ont permis de vérifier ou de découvrir la résistance de nombreuses espèces de Diatomées à de fortes concentrations métalliques.

Navicula seminulum, *N. pygmaea* ou *N. gregaria* supportent 2 ppb de MeHg alors que *Navicula monoculata* ou *N. microcari* s'accommodent de 10 ppb de Cadmium. *Nitzschia palea* supporte également ces deux contaminants à dose élevée. La plupart des formes résistantes ou indifférentes sont halophiles ou saprophiles en accord avec les données de la littérature scientifique, mais certaines réputées sensibles ont montré des adaptations surprenantes au cadmium comme *Cymbella mesiana* qui semble avoir bénéficié de la protection de sa gaine mucilagineuse.

Cette étude réalisée en microcosmes n'est évidemment pas une simulation parfaite des phénomènes qui peuvent se produire en milieu naturel. En revanche, les acquis expérimentaux peuvent être utilisés pour une meilleure calibration des sensibilités interspécifiques établies au sein de communautés complexes.

Il s'agit là d'une étape intermédiaire entre les tests sur cultures pures en conditions contrôlées et l'approche in situ en milieu naturel, l'utilisation de milieux plus complexes (mésocosmes, canaux) pouvant également être envisagée.

Cette approche a permis de tenir compte des interactions entre les différentes espèces, informations ignorées lorsque les expériences sont réalisées sur des cultures monospécifiques (Rachlin *et al.*, 1983). Elle offre également la possibilité de réguler un certain nombre de facteurs abiotiques difficilement contrôlables en milieu naturel et ainsi, d'étudier la réponse des espèces vis à vis d'un polluant particulier.

REMERCIEMENTS – Nous exprimons notre profonde gratitude au Professeur Horst Lange-Bertalot qui a bien voulu examiner notre matériel.

REFERENCES

- ACS E., 1993. Colonization processes of diatoms on artificial substrates in the river Danube near Budapest (Hungary). *Hydrobiologia* **269/270** : 307-315.
- ANDRES S., 1994. Etude expérimentale de la contamination par le Cd de *Corbicula fluminea* à partir des sédiments du Lot ou par voie trophique. Comparaison avec deux autres espèces (*Elodea densa* et *Hexagenia rigida*) et les dérivés du Mercure (HgCl₂ et CH₃HgCl). DEA UPS Toulouse, 48 p.
- BESH W.K., M. RICARD & R. CANTIN, 1972. Benthic Diatoms as indicators of mining pollution in the northwest Miramichi River System, New Brunswick, Canada. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* **57** (1) : 39-74.
- BOUDOU A. & F. RIBEYRE, 1993. Contamination of aquatic biocenoses by mercury compounds : an experimental ecotoxicological approach. In *Aquatic Toxicology*. Jerome O. Nriagu Ed., 74-112.
- CAPBLANCQ J. & M. CASSAN, 1979. Etude du periphyton d'une rivière polluée (L'Agout). Structure et développement des communautés sur substrats artificiels. *Annls Limnol.* **15** (2) : 193-210.
- CEMAGREF, 1982. Etude des méthodes biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. Rapport Q.E. Lyon – A.F. Bassin Rhône-Méditerranée – Corse : 218 p.
- CHOLNOKY B.J., 1968. Die Okologie des Diatomeen. In *Binnengewässern*, Cramer Ed. Vaduz, 699 p.
- CONWAY H.L. & S.C. WILLIAMS, 1979. Sorption of cadmium and its effect on growth and the utilization of inorganic carbon and phosphorus on two freshwater diatoms. *J. Fish. Res. Bd. Can.* **36** : 579-586.
- COSTE M., C. BOSCA & A. DAUTA, 1991. Use of algae for monitoring rivers in France. In B.A. Whitton, E. Rott & G. Friedrich (Eds) *Inst. botanik, Univ. Innsbruck*, 75-88.
- DESCY J.P. & M. COSTE, 1991. A test of methods for assessing water quality based on diatoms. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **24** : 2112-2116.
- GENTER R.B., D.S. CHERRY, E.P. SMITH & J. CAIRNS, 1987. Algal-periphyton population and community changes from zinc stress in stream mesocosms. *Hydrobiologia* **153** : 261-275.
- GOLDSBOROUGH L.G., 1986. An enclosure/substratum system for in situ ecological studies of periphyton. *Arch. Hydrobiol.* **106** : 373-393.
- HÜRLIMANN J. & F. SCHANZ, 1993. The effects of artificial ammonium enhancement on riverine periphytic diatom communities. *Aquatic Sciences* **55** (1) : 40-64.
- INZA B., 1993. Etude en écotoxicologie expérimentale des processus de bioaccumulation du cadmium par un mollusque filtreur d'eau douce *Corbicula fluminea* DEA Bordeaux I (Talence), 25 p.
- KRAMMER K. & H. LANGE-BERTALOT, 1986. Bacillariophyceae 1. Teil : Naviculaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa, H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer; Band 2/1 : G.Fischer verlag., Stuttgart : 876 p.
- KRAMMER K. & H. LANGE-BERTALOT, 1988. Bacillariophyceae 2. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropas, H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer; Band 2/2 : G.Fischer verlag., Stuttgart : 596 p.
- KRAMMER K. & H. LANGE-BERTALOT, 1991. Bacillariophyceae 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Süßwasserflora von Mitteleuropa, H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer (Eds.); (2-3) : Gustav Fischer Verlag, Stuttgart : 600 p.
- KRAMMER K. & H. LANGE-BERTALOT, 1991. Bacillariophyceae 4. Achnantheaceae. Kritische Ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und *Gomphonema*. Süßwasserflora von Mitteleuropa, H. Ettl, G. Gartner, J. Gerloff, H. Heynig & D. Mollenhauer; 2/4 : Gustav Fischer, Stuttgart : 437 p.

- HOFMANN G., 1994. Aufwuchs Diatoms in Seen und ihre Eignung als Indikatoren der Trophie. *Bibliotheca Diatomologica* **30** : 241 p.
- KUIPER J., 1981. Fate and effects of mercury in marine plankton community in experimental enclosures. *Ecotoxicol. environm. safety*. **5** : 106-134.
- LANGÉ-BERTALOT H., 1993. 85 Neue Taxa und über 100 weitere neu definierte Taxa ergänzend zur Süßwasserflora von Mitteleuropa Vol. 2/1-4. *Bibliotheca Diatomologica* **27** : J. 1-453
- LATOUCHE C., J.M. JOUANNEAU & I. PHILIPPS, 1987. Etude de la distribution du Cd dans les bassins de la Dordogne, de la Garonne et du Lot. Institut de Géologie du bassin d'Aquitaine, E/19/87 : 41 p.
- LINDSTROM E., 1991. The effects of heavy metal pollution on periphyton in a Norwegian soft-water river. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **24** : 2215-2219.
- MOUTHON J., 1981. Sur la présence en France et au Portugal de *Corbicula* (*Bivalvia*, *Corbiculidae*) originaire d'Asie. *Basteria* **45** : 109-116.
- ODIN M., 1991. Approche expérimentale des transformations des formes chimiques du mercure dans les systèmes aquatiques continentaux. DEA Bordeaux I (Talence), 50 p.
- PATRICK R., 1978. Effects of trace metals in the aquatic ecosystem. *American scientist*. **66** : 185-191.
- RACHLIN J.W., T.E. JENSEN & B. WARKENTINE, 1983. The growth response of the diatom *Navicula incerta* to selected concentrations of the metals : cadmium, copper, lead and zinc. *Bull. torr. bot. club.* **110** : 217-223.
- ROBBE D., P. MARCHANDISE & D. GOULEAU, 1985. Métaux lourds dans les sédiments de l'estuaire de la Loire. *Water Res.* **19** : 1555-1563.
- ROUND F.E., 1991. Diatoms in river water-monitoring studies. *J. Appl. Phycol.* **3** : 129-145.
- RUSHFORTH S.R., J.D. BROTHERRSON, N. FUNGLADDA & W.E. EVENSON, 1981. The effects of dissolved heavy metals on attached diatoms in the Uintah basin of Utah, U.S.A. *Hydrobiologia* **83** : 313-323.
- SAY P., 1978. Le Riou-Mort, affluent du Lot pollué par les métaux lourds I. Etude préliminaire de la chimie et des algues benthiques. *Annls. Limnol.* **14** (1-2) : 113-131.
- VAN DAM H., A. MERTENS & J. SINKELDAM, 1994. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands J. Aqu. Ecol.* **28** (1) : 117-133.
- WATANABE T., 1985. Etude de la relation entre le périphyton et la qualité chimique de l'eau des rivières : Utilisation de bioessais « in situ » (substrats artificiels) pour caractériser l'état de pollution des eaux Thèse 3^e cycle, Univ. P. Sabatier Toulouse, 127 p.
- WETZEL R.G., 1964. A comparative study of the primary productivity of higher aquatic plants, periphyton and phytoplankton in a large, shallow lake. *Int. rev. Gesamten Hydrobiol.* **49** : 1-61.
- WILDE E.W. & J.R. BENEMANN, 1993. Bioremoval of heavy metals by the use of microalgae. *Biotech. Adv.* **11** : 781-812.

Reçu le 2 décembre 1994; received December 2, 1994
 Accepté le 28 mars 1995; accepted March 28, 1995

LE DIAGNOSTIC DE NOYADE PAR LA RECHERCHE ET L'IDENTIFICATION DES DIATOMÉES

Intérêt d'une extraction tissulaire par digestion enzymatique

B. LUDES¹, M. COSTE² et P. MANGIN¹

¹Institut de Médecine Légale, 11 rue Humann, 67085 Strasbourg, France

²Cemagref, 50 avenue de Verdun, BP 3, 33611 Gazinet Cedex, France

DIATOMÉES
NOYADE
DIAGNOSTIC DE LA MORT
MÉTHODES
DIGESTION ENZYMATIQUE

RÉSUMÉ – Les auteurs exposent l'intérêt de la recherche et de l'identification des Diatomées dans le diagnostic de noyade qui est l'un des plus difficiles en médecine légale. Cette recherche est controversée depuis sa description car ces algues ont également été retrouvées par certains auteurs chez des sujets témoins. En effet, la pression hydrostatique exercée sur un corps immergé entraîne une résorption passive des Diatomées dans les tissus des organes et surtout dans le tissu pulmonaire qui est le plus exposé car en relation directe avec le milieu de submersion par l'intermédiaire des voies aériennes supérieures. Actuellement, malgré ces réserves et grâce aux différentes techniques utilisées pour l'extraction des Diatomées à partir des tissus pulmonaire, rénal, cérébral et hépatique par digestion acide ou digestion enzymatique, nous accordons une crédibilité certaine à cette recherche dans les cas où la composition microfloristique de l'eau et celle des tissus correspondent. La mise en évidence de Diatomées en nombre suffisant dans les autres organes que le poumon peut être indicatrice de noyade. La recherche de Diatomées est une étape importante pour poser le diagnostic de submersion vitale, particulièrement dans le cas de corps putréfiés découverts immergés. Cette technique impose une connaissance approfondie de cette flore qui compte des milliers d'espèces et nécessite une méthodologie précise où l'éviction des sources de contamination est primordiale.

DIATOMS
DROWNING
DIAGNOSIS OF DEATH
METHODS
ENZYMATIC DIGESTION

ABSTRACT – The reliability and applicability of quantitative and qualitative diatom analysis in the diagnosis of putrified bodies has been evaluated in 30 immersion cases using light microscopy. This study included control organ samples from the bodies of 5 persons who died from causes other than drowning. Organ samples were treated by enzymatic method using proteinase K. Diatoms were present in most organ samples of the immersed corpses; no diatoms could be found in the control samples. Our experience was that the enzymatic method seemed to be convenient in terms of rapidity, safety and environmental protection. Qualitative and quantitative analysis of both water and organ samples of immersion cases supported the diagnosis of death by drowning in 30% of the cases studied. The authors suggest that diatom analysis using enzymatic digestion of organs can be used as a criterion for positive diagnosis of drowning.

De tout temps, les médecins légistes ont cherché des signes ou des tests biologiques qui permettent de poser le diagnostic de submersion vitale. Mais s'il existe, sur un corps frais, des signes cliniques en faveur d'une inhalation d'eau tel que le champignon de mousse au niveau des voies aériennes, en cas de putréfaction, ce diagnostic est impossible.

La recherche des Diatomées et leur identification au niveau des tissus de la victime est proposée par de nombreux auteurs dont Peabody et Burgess (1980) et Auer et Mottonen (1988) comme témoins d'une inhalation d'eau, mais d'autres (Gylseth B. et Mowé (1979) ont contesté la valeur de ce test dans la mesure où de telles algues ont pu être retrouvées dans les organes notamment dans le poumon de sujets non décédés de noyade.

Selon Peabody et Burgess (1980) et Timpermann (1972), la mise en évidence de Diatomées dans les tissus pulmonaire, hépatique, rénal et cérébral et notamment dans la moelle osseuse est en faveur d'une noyade quand cette analyse est réalisée par du personnel expérimenté et selon des critères rigoureux.

Ainsi, la recherche de Diatomées est acceptée comme preuve de noyade dans de nombreux pays dont la Finlande.

Dans ce travail nous présentons une étude réalisée sur 35 corps dont 30 victimes de noyade et 5 corps pris comme témoins négatifs.

Alors que les auteurs précédemment cités réalisent l'extraction des Diatomées à partir des tissus humains par une digestion acide, nous proposons une digestion enzymatique à l'aide de la protéinase K.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

* les victimes :

Les victimes ont toutes été repêchées dans les cours d'eau de la région Strasbourgeoise du 1er janvier 1993 au 20 décembre 1993. Le délai post-mortem des corps varie de 1 à 60 jours.

* prélèvements d'eau :

2 échantillons d'eau de 100 ml chacun ont été prélevés sur le site de découverte du corps. L'un des prélèvements réalisé est en surface, l'autre en profondeur et contient des graviers du lit du cours d'eau. Sur ce dernier prélèvement les Diatomées sont recueillies aussi bien dans le liquide en suspension que par grattage des graviers. Les échantillons sont ensuite centrifugés pendant 15 minutes à 2500 tpm et les Diatomées sont purifiées par une incubation dans une solution d'eau oxygénée (130 vol pour cent) à 80°C pendant 12 heures. Après une centrifugation de 15 minutes à 2500 tpm, cette étape est renouvelée à 2 reprises. Après une centrifugation finale de 3000 tpm pendant 15 minutes, le culot est séché à l'air sur une lame porte objet qui est ensuite fixée à l'aide de Naphrax® pour l'examen au microscope optique à l'aide d'un objectif à immersion.

* digestion enzymatique des tissus :

Lors de l'autopsie médico-légale, des prélèvements de 10 g de tissu pulmonaire, hépatique, rénal et cérébral sont effectués en prenant soin d'éviter toute contamination par l'eau de rinçage de la table d'autopsie, par les instruments utilisés et par la verrerie dans laquelle les tissus sont incubés. La décontamination de la verrerie est réalisée par une incubation pendant 12 heures dans la soude molaire.

Les échantillons sont incubés après dilacération dans 100 ml de tampon (0,01 M Tris - HCl, pH 7,5, SDS 2%) et 500 µl de protéinase K (10 mg/ml), à 50°C pendant 12 heures. Après 8 heures d'incubation, 500 µl de protéinase K sont rajoutés au milieu de la réaction après la dissolution des tissus et une centrifugation finale de culot est examinée après étalement sur une lame porte-objet puis fixation à l'aide de Naphrax® pour l'examen au microscope optique.

RÉSULTATS

Dans tous les cas examinés, aucun contact direct avec l'eau d'immersion et les tissus n'a été observé.

Dans les échantillons d'eau, la détermination des espèces dominantes se fait après comptage de 200 Diatomées. Toutes les eaux prélevées en profondeur contiennent des Diatomées en nombre suffisant pour l'analyse comparative. Dans 5 prélèvements d'eau superficielle sur 30, moins de 5 Diatomées par 100 µl de culot ont été dénombrées.

Dans les tissus humains, la présence de Diatomées est considérée par Auer et Mottonen (1988) comme positive si plus de 20 Diatomées sont retrouvées à l'examen d'une lame porte-objet effectuée à partir du tissu pulmonaire. Pour notre part, nous avons fixé cette limite à 20 Diatomées par 100 µl de culot obtenu à partir de 10 g de tissu pulmonaire. A partir des autres organes nous considérons cette analyse concluante quand 5 Diatomées par 100 µl de culot obtenu à partir de 10 g de tissu, sont dénombrées sur des lames. En deçà de ces chiffres, la présence de Diatomées relève d'une contamination.

Sur les 30 corps retirés de l'eau, la recherche de Diatomées est uniquement positive sur le tissu pulmonaire dans 18 cas, avec plus de 60 Diatomées par 10 g de tissu pulmonaire, dans 9 cas, les résultats sont positifs dans les prélèvements pulmonaires et dans les autres tissus analysés (cerveau, foie, rein) (Tabl. I). Dans 3 cas, aucune Diatomée n'a été retrouvée dans les organes de la victime alors qu'elles sont présentes dans les prélèvements d'eau.

Tabl. I. - Résultats de l'analyse des tissus des victimes.

Cas	Eau	Poumons	Cerveau	Reins	Foie
18	+	+	-	-	-
3	+	+	-	+	-
1	+	+	+	-	-
5	+	+	-	-	+
3	+	-	-	-	-

Le nombre maximum de Diatomées retrouvées dans le tissu pulmonaire est de 80 par 10 g de tissu relevant de 5 à 10 genres différents suivant la richesse de la microflore aquatique. Dans les autres tissus, le nombre maximum est de 15 par 10 g de tissu relevant de 3 genres différents.

Aucune Diatomée n'a été découverte dans les tissus des 5 cas témoins.

Les genres les plus fréquemment retrouvés dans l'analyse des tissus sont *Navicula*, *Frustulia*, *Cyclotella*, *Nitzschia*, *Melosira*, *Fragilaria*, *Gomphonema*, *Synedra*, *Cymbella* et *Tabellaria*.

Dans les eaux étudiées, les genres *Navicula*, *Frustulia*, *Cyclotella*, *Nitzschia*, *Melosira* et *Cyclotella* ont été individualisés.

D'après notre expérience, les Diatomées dont les tailles varient entre 5 µm et 50 µm ont été retrouvées dans le tissu pulmonaire et ont donc réussi à pénétrer au travers de la barrière alvéolo-capillaire.

DISCUSSION

Il est essentiel de tenir compte lors de l'interprétation des résultats de la recherche des Diatomées des possibilités de contamination donc de la présence de Diatomées dans les tissus pulmonaires de personnes non noyées. Pour Polson et coll. (1985), le nombre maximum de Diatomées découvertes chez une personne noyée est de 20 Diatomées/100 g de tissu pulmonaire et de 13 Diatomées pour 100 g de foie. Pachar et Cameron (1992) ont découvert de 5 à 25 Diatomées pour 100 g de tissu pulmonaire et 10 Diatomées pour les autres organes.

Dans notre étude, aucune Diatomée n'a été retrouvée dans les échantillons tissulaires. Pour éviter la contamination des tissus par des Diatomées présentes sur la vaisselle, cette dernière doit être décontaminée dans une solution molaire de soude. Les différentes solutions et les réactifs employés doivent être filtrés avant leur emploi. Le prélèvement d'eau notamment en profondeur permet de dénombrer un nombre d'algues suffisant pour déterminer les espèces dominantes notamment en grattant les pierres prélevées dans le lit des cours d'eau. Nous conseillons le prélèvement en profondeur plutôt que celui des eaux de surface qui sont fréquemment pauvres en Diatomées (4).

Le diagnostic d'inhalation ne peut être prononcée que si l'analyse de la microflore donne le même résultat aussi bien dans les tissus des victimes que dans les échantillons d'eau.

Les analyses sont positives et concordantes dans l'eau et uniquement dans le tissu pulmonaire dans 60% des cas étudiés. Ce résultat est supérieur à celui de la série de 107 cas décrit par Auer et Mottonen (1) qui est de 30,8%. Timpermann (1972) suggère que la découverte de Diatomées en nombre suffisant dans le poumon uniquement peut être en faveur d'une courte période d'agonie. L'inhalation d'eau peut être fortement suspectée mais non affirmée sur un résultat positif dans le tissu pulmonaire dans la mesure où les algues pourraient pénétrer passivement dans les alvéoles

pulmonaires par l'action de la pression hydrostatique si le corps est immergé à grande profondeur (supérieur à 3-4 m). Cette pénétration est facilitée par la putréfaction des tissus. Toutefois dans notre série limitée, le diagnostic d'inhalation est positif dans 30% des cas. Ce résultat est supérieur à celui de 20% rapporté par Neidhard et Greedyke (1967) et inférieur aux 57,9% donné par Auer et Mottonen (1988). La méthode de digestion par la protéinase K semble être la plus aisée et la plus rapide et permet d'éviter l'emploi d'acides forts (Kobayashi *et al.*, 1993; Ludes *et al.*, 1994).

CONCLUSION

La recherche qualitative et quantitative des Diatomées dans les tissus d'une victime et dans l'eau d'immersion peut constituer un argument en faveur d'une inhalation. Toutefois la noyade peut être suspectée quand un nombre suffisant de Diatomées de même espèce est découvert aussi bien dans les tissus que dans l'eau d'immersion. Dans ces cas, les algues ont pénétré dans la circulation sanguine et dans les organes à partir des poumons.

Une analyse négative n'exclut pas une noyade dans la mesure où l'eau d'immersion est parfois très pauvre en Diatomée et où le décès d'une personne retrouvée dans l'eau peut également résulter d'autres mécanismes qu'une inspiration massive d'eau. Pour nous, la digestion enzymatique des tissus par la protéinase K est la méthode de choix.

Même si l'interprétation des résultats est délicate, la recherche des Diatomées dans les tissus d'une victime et dans l'eau d'immersion doit être réalisée de façon systématique. Le diagnostic de noyade est porté en fonction de l'ensemble des données cliniques et biologiques recueillies lors de l'autopsie et de tous les examens complémentaires réalisés (examens histologiques et toxicologiques).

BIBLIOGRAPHIE

- AUER A., M. MOTTONEN M., 1988. Diatoms and drowning. *Z. Rechtsmedizin*, **101** : 87-98.
- GYLSETH B., G. MOWE, 1979. Diatoms in lung tissue. *Lancet*, **29** : 1375.
- KOBAYASHI M., Y. YAMADA, W.D. ZHANG, Y. ITAKURA, M. NAGAO, T. TAKATORI, 1993. Novel detection of plankton from lung tissue by enzymatic digestion method. *For. Sci. Int.*, **60** : 81-90.
- LUDES B., S. QUANTIN, M. COSTE, P. MANGIN, 1994. Application of a simple enzymatic digestion method for diatom detection in the diagnosis of

drowning in putrefied corpses by diatom analysis. *Int. J. Leg. Med.*, **107** : 37-41.

NEIDHART D.A., R.M. GREEDYKE, 1967. The significance of diatom demonstration in the diagnosis of death by drowning. *Am. J. Clin. Path.*, **48** (4) : 377-382.

PACHAR J.V., J.M. CAMERON, 1992. Submersion cases : a retrospective study 1988-1990. *Med. Sci. Law*, **32** : 15-17.

PEABODY A.J., R.M. BURGESS, 1980. Diatoms and drowning. *Med. Sci. Law*, **20** (4) : 254-261.

POLSON C.J., D.J. GEE, B. KNIGHT, 1985. Drowning. *In The Essentials of Forensic Medicine*. Pergamon Press, Oxford, p. 421-428.

SCHELLMANN B., W. SPERL, 1979. Nachweis im Knochenmark (Femur) Nichtertrunkener. *Z. Rechtsmedizin*, **83** : 319-324.

TIMPERMAN J., 1972. The diagnosis of drowning. A review. *For. Sci. Int.*, **1** : 397-407.

Reçu le 21 novembre 1994; received November 21, 1994
 Accepté le 31 janvier 1995; accepted January 31, 1995

CONCLUSION

La recherche quantitative et qualitative des Diatomés dans les tissus d'une victime et dans l'eau d'immersion peut constituer un argument en faveur d'une inhalation. Toutefois la nouveauté peut être appréciée quand un nombre suffisant de Diatomés de même espèce est découvert dans les tissus les jours qui suivent l'eau d'immersion. Dans ces cas, les Diatomés ont pénétré dans la circulation sanguine et dans les organes à partir des poumons. Une analyse négative n'exclut pas une noyade dans la mesure où l'eau d'immersion est pauvre en Diatomés et où le décès a une courte durée. Pour nous, la digestion enzymatique des tissus par la pepsine K est la méthode de choix. Même si l'interprétation des résultats est délicate, la recherche des Diatomés dans les tissus d'une victime et dans l'eau d'immersion doit être réalisée de façon systématique. Le diagnostic de noyade est porté en fonction de l'ensemble des données cliniques et biologiques recueillies lors de l'autopsie et de tous les examens complémentaires réalisés (examens histologiques et toxicologiques).

BIBLIOGRAPHIE

AUER A., M. MOTTONEN M., 1988. Diatoms and drowning. *X Rechtsmedizin*, **101** : 87-98.

EYLERTH E., G. MOWE, 1979. Diatoms in lung tissue. *Acta Paediatr*, **68** : 1475.

KOHAYASHI M., Y. YAMADA, W.B. ZHANG, Y. IIA, K. KUBO, M. KAGAO, T. TAKATORI, 1993. Noyade: detection of diatoms from lung tissue by enzymatic digestion method. *Acta Paediatr*, **82** : 81-90.

LUDES B., S. QUANTIN, M. COSTE, P. MANGIN, 1992. Application of a simple enzymatic digestion method for diatom detection in the diagnosis of

DISCUSSION

Il est essentiel de tenir compte lors de l'interprétation des résultats de la recherche des Diatomés dans des possibilités de contamination due à la présence de Diatomés dans les tissus pulmonaires de personnes non noyées. Pour Polson et al (1985), le nombre maximum de Diatomés détectés chez une personne noyée est de 20 Diatomés/100 g de tissu pulmonaire et de 13 Diatomés pour 100 g de tissu Pacher et Cameron (1992) ont découvert de 2 à 25 Diatomés pour 100 g de tissu pulmonaire et 10 Diatomés pour les autres organes. Dans notre étude, aucune Diatomée a été retrouvée dans les échantillons testés. Pour éviter la contamination des tissus par des Diatomés présents sur la vasculature, cette dernière doit être décontaminée dans une solution molaire de soude. Les différentes solutions et les résultats employés doivent être bien notés avant tout examen. Le prélèvement d'eau notamment en profondeur permet de dénombrer un nombre d'algues suffisant pour déterminer les espèces dominantes notamment en gardant les parties prélevées dans le lit des cours d'eau. Nous considérons le prélèvement en profondeur plus que celui des eaux de surface qui sont fréquemment pauvres en Diatomés (4). L'atmosphère d'inhalation ne peut être prouvé car et l'analyse de la microflore donne le même résultat aussi bien dans les tissus des victimes que dans les échantillons d'eau. Les analyses sont positives et concordantes dans l'eau et uniquement dans le tissu pulmonaire dans 60% des cas étudiés. Ce résultat est supérieur à celui de la série de 107 cas décrit par Auer et Mottonen (1) qui est de 30,8%. Timperman (1972) suggère que la découverte de Diatomés en nombre suffisant dans le poumon uniquement peut être en faveur d'une courte période d'agonie. L'inhalation d'eau peut être facilement suspectée mais non affirmée sur un résultat positif dans le tissu pulmonaire dans la mesure où les algues pourraient pénétrer passivement dans les alvéoles

MISE EN ÉVIDENCE D'UNE FLUCTUATION CLIMATIQUE D'APRÈS LES DIATOMÉES QUATERNAIRES DU MAAR DE VICO (Italie centrale)

Evidence of a climatic fluctuation based on the Quaternary diatoms of Vico maar lake (Central Italy)

I. MERGEAI

Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix, Département de Géologie,
rue de Bruxelles, 61, B-5000 Namur, Belgique

DIATOMÉES
QUATERNAIRE SUPÉRIEUR
FLUCTUATION CLIMATIQUE
ITALIE CENTRALE
CYCLOTELLA CYCLOPUNCTA

DIATOMS
UPPER QUATERNARY
CLIMATIC FLUCTUATION
CENTRAL ITALY
CYCLOTELLA CYCLOPUNCTA

RÉSUMÉ – Trois sondages adjacents ont été réalisés dans les sédiments lacustres du maar de Vico (Latium, Italie centrale). D'après l'analyse des Diatomées, des résultats paléocologiques relatifs aux fluctuations de l'épaisseur de la tranche d'eau, du pH et de la salinité totale de l'eau sont présentés pour la partie inférieure des sédiments d'âge postérieur à 95 ± 10 ka. Un intérêt particulier est porté à une fluctuation climatique présente au sein d'une phase palynologique interglaciaire.

ABSTRACT – Three adjacent boreholes have been drilled in the sediments of Vico maar lake (Latium, Central Italy). Based on diatom analysis, palaeoecological results relative to the fluctuations of the thickness of the water table, the pH and the total salinity of the water are presented for the lower part of the sediments deposited after 95 ± 10 ky. Special attention is drawn to a climatic fluctuation evidenced during a palynological interglacial period.

INTRODUCTION

Le maar de Vico se situe en Italie centrale dans la région du Latium à environ 50 km au nord-ouest de Rome. L'altitude du plan d'eau est de 510 m (Fig. 1). Le lac actuel (12 km²) occupe environ les 3/5 du bassin volcanique et se présente sous une forme subcirculaire. La profondeur moyenne du lac est de 22 m avec un maximum à 50 m. Les parois de la caldeira atteignent une altitude de 800 à 900 m dans la partie nord, une altitude maximale de 965 m à l'ouest (Monte Fogliano) et une altitude d'environ 650 m à l'est et au sud (Francus *et al.*, 1993).

Trois sondages adjacents profonds respectivement de 22, 19 et 16 m ont été carottés dans les sédiments lacustres du maar de Vico à environ 300 m au nord-ouest des rives actuelles du lac (Fig. 1).

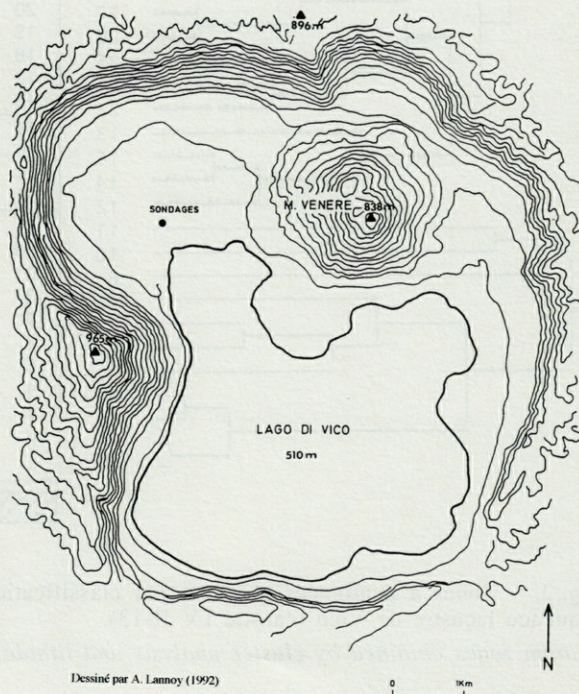


Fig. 1. – Carte topographique du maar de Vico et localisation des sondages.

Topographic map of Vico Maar and location of the drills holes.

Une interprétation paléocéologique est présentée pour la partie inférieure des sédiments déposés après le dernier événement volcanique de la région. Cet épisode est daté de 95 ± 10 ka (Bertagnini et Sbrana, 1986; Laurenzi et Villa, 1985, 1987) (Fig. 2).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

La lithologie de la base de la carotte (Fig. 2) correspond à une boue organique litée particulièrement riche en restes de plantes entre 1627 et 1617 cm de profondeur. Vient ensuite une boue organique litée gris-vert.

Dans le sommet de la séquence, la boue devient massive et noire.

Pour l'étude des Diatomées, la quantité prélevée nécessaire à la préparation des lames permanentes est de l'ordre de 1 cm^3 . Le traitement chimique des échantillons se déroule comme suit : destruction de la matière organique par ajout d'eau oxygénée, dispersion des argiles par ajout de pyrophosphate de sodium et destruction des carbonates par addition d'acide sulfurique. Les échantillons sont ensuite montés sur lame de verre. Le milieu de montage utilisé est le Naphrax. Les lames permanentes ont été observées à l'aide d'un microscope optique Zeiss Axiophot muni d'un objectif à immersion 100X. 500 valves sont comptées par échantillon.

Les données autoécologiques sont extraites de Gasse (1980) et de Denys (1991). La taxonomie utilisée tient

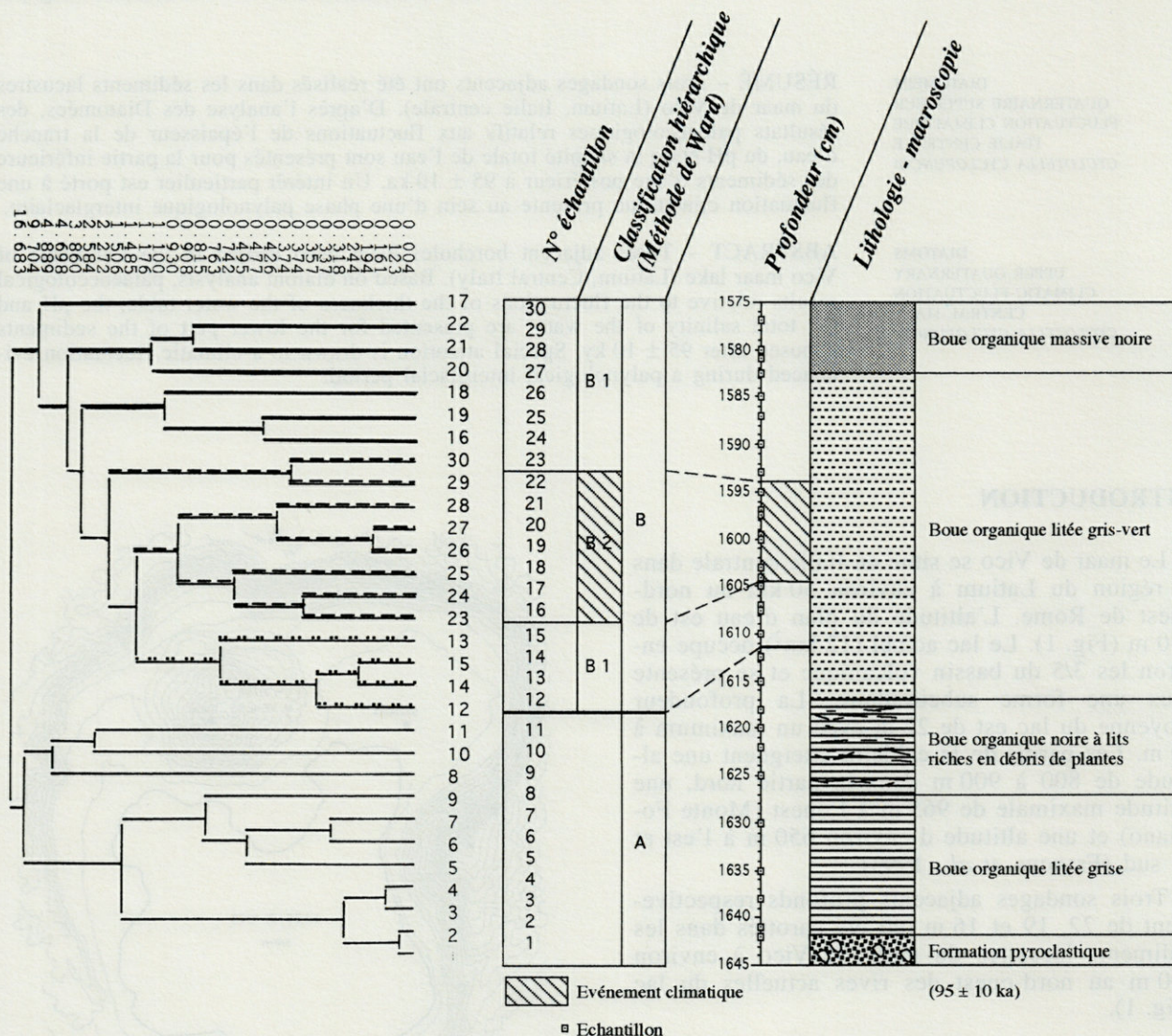


Fig. 2. - Zones à Diatomées obtenues par classification hiérarchique (méthode de Ward) et log lithologique de la séquence lacustre de Vico (carotte LV II-13).

Diatom zones obtained by cluster analysis and lithological log from the lacustrine sequence of Vico (LV II-13).

compte des ouvrages de Krammer et Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991a et 1991b).

Une classification hiérarchique (Méthode de Ward, Logiciel Clustan (Wishart, 1978)) a été réalisée dans le but de déterminer les différentes zones à Diatomées (Fig. 2).

RÉSULTATS

Deux zones à Diatomées peuvent être distinguées : les zones A et B. La zone B est constituée de la sous-zone B1 regroupant, d'une part, les échantillons 12 à 15 et, d'autre part, les échantillons 23 à 30 ainsi que de la sous-zone B2 (échantillons 16 à 22) (Fig. 2).

Zone à Diatomées A : 1642-1611,5 cm

L'assemblage à Diatomées de la zone A se compose essentiellement de *Achnanthes minutissima* Kützing, *Navicula cincta* (Ehrenberg) Ralfs, *Epithemia argus* (Ehrenberg) Kützing, *Nitzschia angusteforaminata* Lange-Bertalot, *Caloneis silicula* (Ehrenberg) Cleve, *Navicula oblonga* Kützing et *Amphora libyca* Ehrenberg (Fig. 3). Les

espèces épiphytiques, benthiques et aérophiles atteignent 100% de l'assemblage de Diatomées (Fig. 4). Cet assemblage indique un lac peu profond et un environnement à pH neutre à alcalin.

Le paléolac de Vico était un lac d'eau douce ; en effet, 80 à 90% des Diatomées rencontrées sont oligohalobes c'est-à-dire se développant de façon optimale dans des eaux de salinité totale ≤ 2 g/l. Cependant, quelques fluctuations du pourcentage de Diatomées stimulées par une légère concentration des eaux en sels sont observées. Les Diatomées oligohalobes-halophobes comme par exemple *Pinnularia appendiculata* (Agardh) Cleve se rencontrent exclusivement au sein de la zone A (Fig. 4).

Zone à Diatomées B : 1611,5-1577 cm

L'interprétation paléoécologique de cette zone à Diatomées reste imprécise par suite du manque d'information autoécologique relatif à une seule espèce : *Cyclotella cyclopuncta*, décrite en 1990 par Håkansson et Carter (Pl. I). Cette espèce est probablement confondue avec d'autres d'espèces du genre *Cyclotella*.

Les valves sont circulaires et présentent un diamètre de 9 à 18 μ m. La surface valvaire est plane.

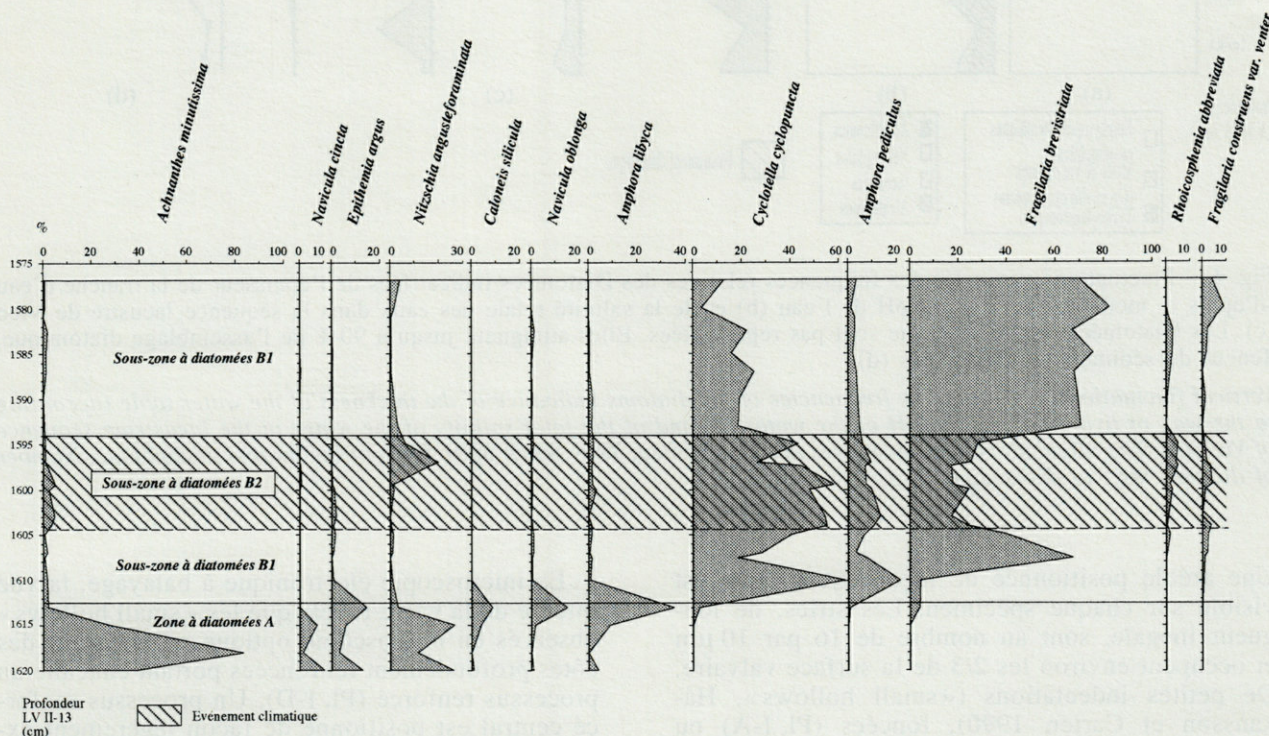


Fig. 3. – Fluctuations verticales des fréquences relatives des principales espèces de Diatomées dans la séquence lacustre de Vico (LV II-13).

Vertical fluctuations of the relative frequencies of the main diatom taxa in the lacustrine sequence of Vico (LV II-13).

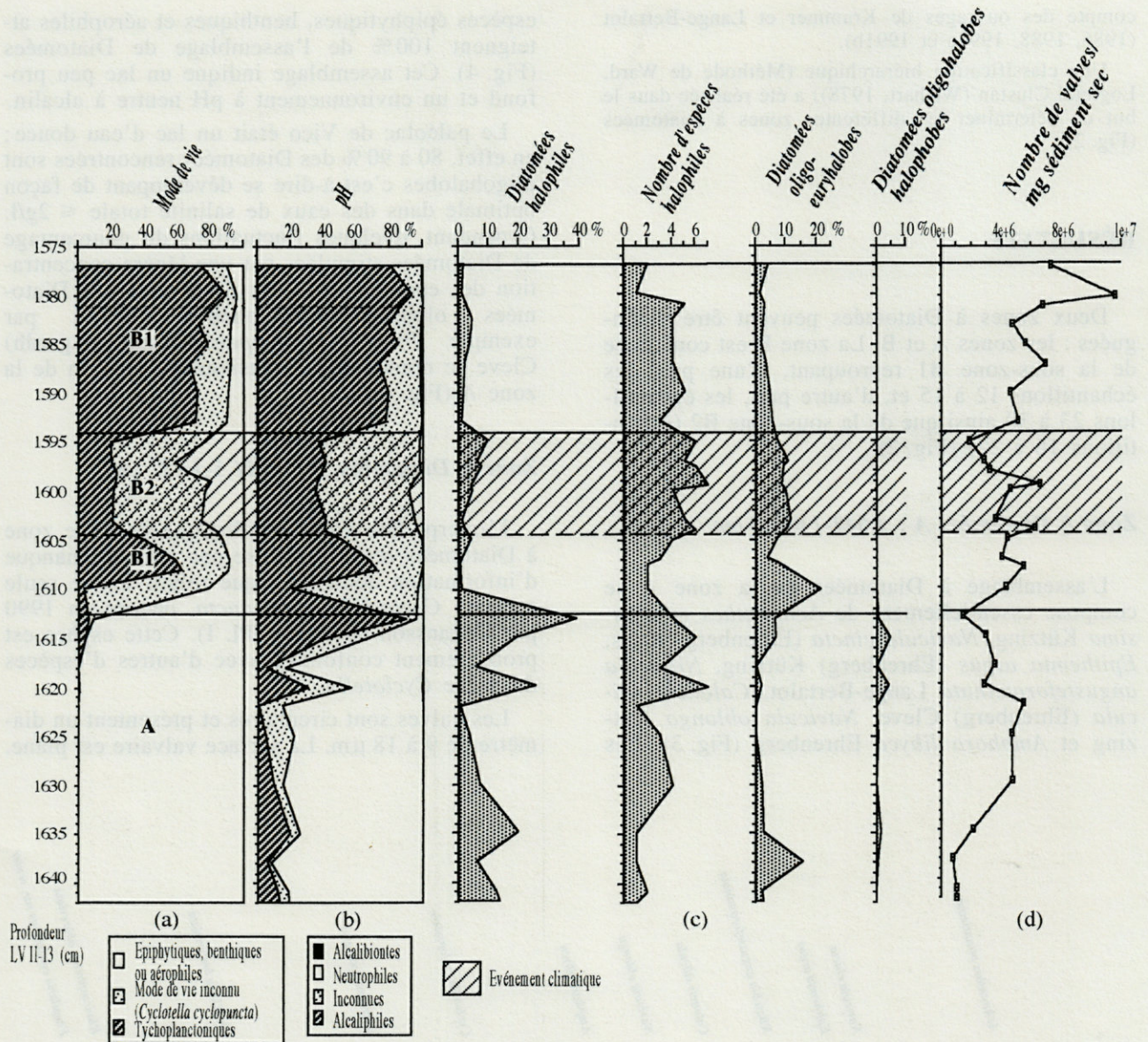
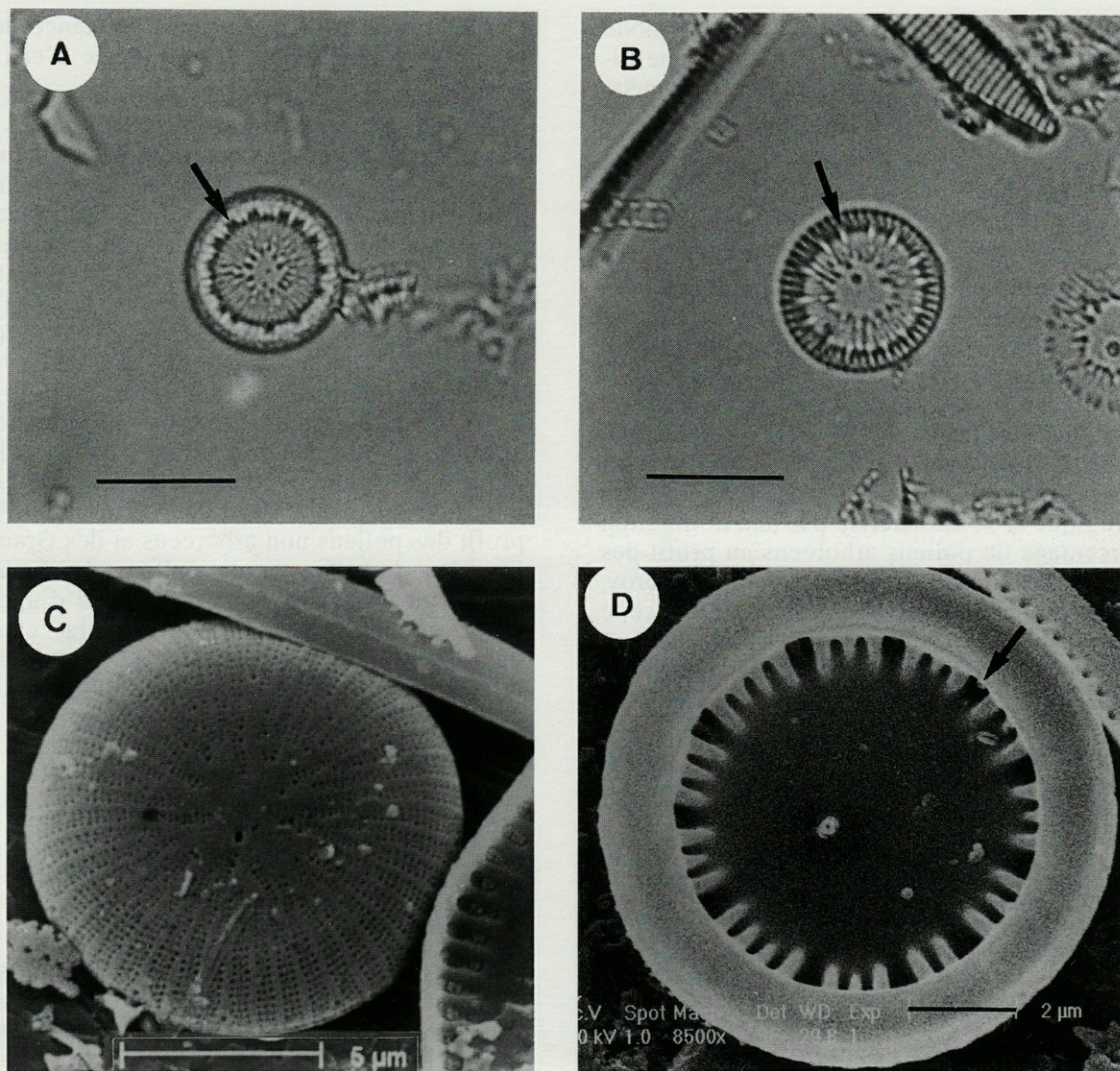


Fig. 4. – Fluctuations verticales des fréquences relatives des Diatomées indicatrices de l'épaisseur de la tranche d'eau (d'après le mode de vie) (a), du pH de l'eau (b) et de la salinité totale des eaux dans la séquence lacustre de Vico (c). Les Diatomées oligohalobes ne sont pas représentées. Elles atteignent jusqu'à 90% de l'assemblage diatomique. Teneur du sédiment en Diatomées (d).

Vertical fluctuations of the relative frequencies of the diatoms indicative of the thickness of the water table (according to the way of living) (a), of the pH of the water (b) and of the total salinity of the water in the lacustrine sequence of Vico (c). The oligohalobous diatoms are not represented. They reach up to 90% of the diatom assemblage. Number of diatoms mg^{-1} of dry sediment (d).

Une aréole positionnée de façon excentrique est visible sur chaque spécimen. Les stries, de longueur inégale, sont au nombre de 16 par $10 \mu\text{m}$ et occupent environ les 2/3 de la surface valvaire. De petites indentations («small hollows», Håkansson et Carter, 1990), foncées (Pl. I-A) ou claires (Pl. I-B) en fonction de la mise au point, sont situées à la jonction entre la surface valvaire et le manteau. Les indentations sont espacées toutes les 2 à 4 stries.

En microscopie électronique à balayage, la vue interne de la valve révèle que les «small hollows» observés en microscopie optique représentent des côtes profondément renforcées portant chacune un processus renforcé (Pl. I-D). Un processus renforcé central est positionné de façon légèrement excentrique. Notons encore la présence d'un processus labié à la jonction entre la surface valvaire et le manteau.



Pl. I. – *Cyclotella cyclopuncta* Håkansson & Carter, 1990.

A-B : Microscopie optique. Les flèches indiquent les « small hollows » foncés (A) ou clairs (B) en fonction de la mise au point. Echelle = 10 μ m. C-D : Microscopie électronique à balayage. Vue valvaire externe (C); vue valvaire interne (D). La flèche indique la côte renfoncée (« small hollow » observé en microscopie optique).

Cyclotella cyclopuncta Håkansson & Carter 1990.

A-B : Light microscopy. The arrow = « small hollow » dark (A) or light (B) depending on focus level. Scale bar = 10 μ m. C-D : Scanning electron microscopy. Exterior valve view (C); Interior valve view (D). The arrow = recessed costae (« small hollow » observed in light microscopy).

L'assemblage à Diatomées de la sous-zone B1 regroupant les échantillons 12 à 15 se compose essentiellement de *C. cyclopuncta*, *Amphora pediculus* (Kützing) Grunow et *Fragilaria brevistriata* Grunow indiquant des conditions plus limniques que dans la zone précédente (Fig. 3). En effet, les espèces tychoplantoniques atteignent 60 % de l'assemblage (Fig. 4). En plus de cette augmentation de l'épaisseur de la tranche d'eau, l'assemblage de Diatomées est indicatif d'un environnement plus alcalin que précédemment.

La sous-zone B2 se compose essentiellement de *C. cyclopuncta*, *A. pediculus*, *F. brevistriata*, *Rhoicosphenia abbreviata* (Agardh) Lange-Bertalot et *Fragilaria construens* var. *venter* (Ehrenberg) Grunow (Fig. 3).

L'abondance relative de *Achnanthes minutissima* et *Nitzschia angusteforaminata*, déjà présents dans la zone A, augmente dans cette subdivision B2.

Les Diatomées épiphytiques, benthiques et aérophiles atteignent jusqu'à 40 % de l'assemblage

à Diatomées (Fig. 4). Cette fluctuation du mode de vie des Diatomées supporte la thèse d'une diminution relative de l'épaisseur de la tranche d'eau, peut-être due à un apport moindre en précipitations.

L'abondance de *C. cyclopuncta* (jusqu'à 60% de l'assemblage) ne permet malheureusement pas de préciser les autres facteurs écologiques.

Remarquons cependant que le pourcentage des Diatomées stimulées par une légère concentration des eaux en sels, le nombre d'espèces halophiles et le pourcentage de Diatomées oligo-euryhalobes augmentent (Fig. 4). L'accroissement léger de la concentration des eaux en sels serait lié à une phase de bas niveau lacustre. L'événement en question se situe au sein d'une phase interglaciaire palynologique et se caractérise par une diminution du pourcentage de pollens arboréens au profit des pollens non arboréens et des Graminées (Leroy, comm. personnelle). D'après Leroy (1994), cette ouverture soudaine du paysage arboréen peut avoir été causée par une détérioration du climat, un retour à des conditions plus froides et plus sèches. De plus, la présence de pollens de *Typha* renseigne un développement temporaire d'une végétation marécageuse en bordure du lac causé par une diminution du niveau du lac.

Il est intéressant de noter que la teneur du sédiment en Diatomées, exprimée en nombre de valves par mg de sédiment sec, régresse au cours de cet épisode relativement froid et sec. En effet, la teneur fluctue de $6,6 \cdot 10^6$ à $1,8 \cdot 10^6$ valves par mg de sédiment sec (Fig. 4).

La sous-zone B1 regroupant les échantillons 23 à 30 se caractérise par la dominance de *F. brevis-triata* (jusqu'à 82% de l'assemblage de Diatomées). *C. cyclopuncta* est quant à elle moins abondante (jusqu'à 27% de l'assemblage) (Fig. 3).

L'accroissement net du pourcentage de Diatomées tychoplanctoniques traduit une augmentation relative de l'épaisseur de la tranche d'eau (Fig. 4).

L'assemblage à Diatomées est de plus indicatif de conditions franchement alcalines. Le caractère dilué des eaux se marquerait par une diminution du pourcentage de Diatomées stimulées par une légère concentration des eaux en sels, du nombre d'espèces halophiles et du pourcentage de Diatomées oligo-euryhalobes (Fig. 4).

CONCLUSION

L'étude des Diatomées des sédiments de la base du sondage de Vico, mis en place à la suite du dernier épisode volcanique de la région (95 ±

10 ka), révèle principalement l'existence de fluctuations de l'épaisseur de la tranche d'eau.

Après le dernier épisode volcanique, le lac de Vico était peu profond (zone à Diatomées A). Il évolue ensuite vers des conditions franchement lacustres (sous-zone à Diatomées B1, échantillons 12 à 15). Par la suite (sous-zone à Diatomées B2), une diminution de l'épaisseur de la tranche d'eau a été mise en évidence. Un accroissement léger de la concentration des eaux en sels est également observé. Cet événement est à corrélérer avec une ouverture soudaine du paysage pouvant avoir été causée par une détérioration du climat, un retour à des conditions plus froides et plus sèches. Cet épisode se situe au sein d'une période palynologique interglaciaire et se caractérise par une diminution du pourcentage de pollens arboréens au profit des pollens non arboréens et des Graminées. De plus, la présence de pollens de *Typha* renseigne un développement temporaire d'une végétation marécageuse en bordure du lac causé par une diminution du niveau du lac. Au sommet de la séquence sédimentaire étudiée, des conditions franchement lacustres dominant (sous-zone à Diatomées B1, échantillons 23 à 30).

RÉFÉRENCES

- BERTAGNINI A. & A. SBRANA, 1986. Il vulcano di Vico: Stratigrafia del complesso vulcanico e sequenze eruttive delle formazioni piroclastiche. *Mem. Soc. Geol. It.*, **35**: 699-713.
- DENYS L., 1991. A Check-list of the diatoms in the Holocene deposits of the western Belgian coastal plain with a survey of their apparent ecological requirements - I. Introduction, ecological code and complete list. *Minist. Aff. Economiques, Serv. Géol. Belgique, Profes. Paper*, **246**, 41 p.
- FRANCUS P., S. LEROY, I. MERGEAI, G. SERET & G. WANSARD, 1993. A multidisciplinary study of the Vico maar sequence (Latium, Italy): part of the last cycle in the Mediterranean area. Preliminary results. J.F.W. Negendank, B. Zolitschka (Eds.), *Paleolimnology of European maar lakes. Lect. Notes Earth Science*, **49**: 289-304.
- GASSE F., 1980. Les diatomées lacustres plio-pléistocènes du Gadeb (Ethiopie), systématique, paléoécologie, biostratigraphie. *Rev. algol., mém.*, **3**, 249 p.
- HÅKANSSON H. & J.R. CARTER, 1990. An interpretation of Hustedt's terms «Schattenlinie», «Perlenreihe» and «Höcker» using specimens of the *Cyclotella radiosia* -complex, *C. distinguenda* Hust., and *C. cyclopuncta* nov. sp. *J. Iowa Acad. Sci.*, **97** (4): 153-156.
- KRAMMER K. & H. LANGE-BERTALOT, 1986. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Band 2/1, Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae. G. Fischer Verlag, Jena, 876 p.

- KRAMMER K. & H. LANGE-BERTALOT, 1988. Süswasserflora von Mitteleuropa. Band 2/2, Bacillariophyceae 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. G. Fischer Verlag, Jena, 596 p.
- KRAMMER K. & H. LANGE-BERTALOT, 1991a. Süswasserflora von Mitteleuropa. Band 2/3, Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Euntoiaceae, G. Fischer Verlag, Jena, 576 p.
- KRAMMER K. & H. LANGE-BERTALOT, 1991b. Süswasserflora von Mitteleuropa. Band 2/4, Bacillariophyceae 4. Teil: Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und *Gomphonema*, G. Fischer Verlag, Jena, 436 p.
- LAURENZI M.A. & I.M. VILLA, 1985. K/Ar chronology of the Vico Volcano (Latium, Italy). Abstracts IAVCEI, 1985 Scientific Assembly, Giardini - Naxos, Italy.
- LAURENZI M.A. & I.M. VILLA, 1987. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronostratigraphy of Vico ignimbrites. *Per. Mineral.*, **56**: 285-293.
- LEROY S.A.G., 1994. The last glacial interstadial periods of the Vico maar sequence (Latium, Italy) by palynology in the scope of the long continental sequences and the ice cores. *Schriften der Alfred Wegener - Stiftung 1/94, Alfred Wegener Conference «climate dynamics recorded in long continental resolution time series since the last interglacial»*, 28-09-1991/02-10-1994: 104-110.
- WISHART D., 1978. Cluster analysis package. Edinburg Univ.

Reçu le 17 novembre 1994; received November 17, 1994
Accepté le 16 mars 1995; accepted March 16, 1995

DIATOMS FROM THE ARCHEOLOGICAL SITE, «LE GRAND MARAIS», CHAMPAGNE-SUR-OISE, FRANCE

Karen K. SERIEYSSOL & V. KRIER

The American University of Paris, 31 av. Bosquet, 75007 Paris, France

Service Départemental d'Archéologie du Val-d'Oise, Abbaye de Maubuisson, 95310 St. Ouen-L'Aumône, France

ARCHEOLOGY
DIATOMS
PALEOECOLOGY
OISE
FRANCE
NEOLITHIC
MIDDLE AGE

ABSTRACT – A secondary channel associated with the archeological site «Le Grand Marais» was studied for its different stratigraphic layers and their diatom content. A reconstruction of the depositional environment of the third erosional phase was made :

– Layer 11 : The river Oise continued to flow in the secondary channel during this phase of deposition. Human influence on the quality of the water is shown by the presence of saprophilous and saprobiontic species.

– Layer 4 : A decrease in the current of the river is noted by an increase in the epiphytic species population.

– Layer 5 : A continuation of the environmental condition noted in layer 4 but with an increase in the amount of saproxene and saprophilous species.

– Layer 6, 7, and part of 8 : There is a marked decrease in the epiphyte population with an increase in the species which live in brooks and small streams. An increase in the statospores of chrysophytes indicate clearer and cleaner water conditions.

– Layer 8 : The reappearance of planktonic species in the sediments might be explained by their sedimentation during periods of flooding.

ARCHÉOLOGIE
DIATOMÉES
PALÉOÉCOLOGIE
OISE
FRANCE
NÉOLITHIQUE
MOYEN ÂGE

RÉSUMÉ – Un ancien chenal de l'Oise coupe le site archéologique «Le Grand Marais». Les dépôts trouvés dans cet ancien lit ont été étudiés, ainsi que leur contenu en Diatomées. Les informations tirées de cette étude ont permis de reconstituer l'environnement contemporain de la troisième phase d'érosion :

– couche 11 : Le courant de l'Oise a continué de s'écouler dans ce bras. Une influence anthropologique sur la qualité des eaux est montrée par la présence d'espèces saprophiles et saprobiontes.

– couche 4 : La diminution de l'influence du courant est marquée par la présence d'espèces épiphytiques.

– couche 5 : Le régime hydrologique relevé dans la couche 4 se poursuit. On note une plus forte influence des espèces saproxènes et saprophiles dans cette couche.

– couche 6, 7 et plusieurs échantillons de la couche 8 : une nette diminution des espèces épiphytiques et par ailleurs une augmentation des espèces vivant dans des ruisseaux ainsi qu'une augmentation des statospores de chrysophytes font penser à un abaissement du niveau trophique de l'eau, ainsi qu'à une augmentation de sa transparence.

– couche 8 : Le retour des espèces planctoniques peut être expliqué par une sédimentation déterminée principalement par les périodes de grandes crues.

INTRODUCTION

A series of stratigraphic cross-sections were taken as part of a rescue of an archeological site due to the construction of the A16 tollway linking Paris with Beauvais. The site is located along the Oise river near the village of Champagne sur Oise (Val d'Oise) where the flood plain increases to about 1 km in width. The Oise along with the

Yonne and the Marne are the three most important tributaries of the Seine. The 302 km long river starts in Belgium and ends at Conflans-St-Honorine where it enters the Seine. This is about 30 km below the site. This makes the river an important means of transporting goods, and harbors along the Oise are known from the Gaulo-roman time. The site is situated on the Ronquerolles anticline where the river has exposed Campagnian Chalks from the Mesozoic Era.

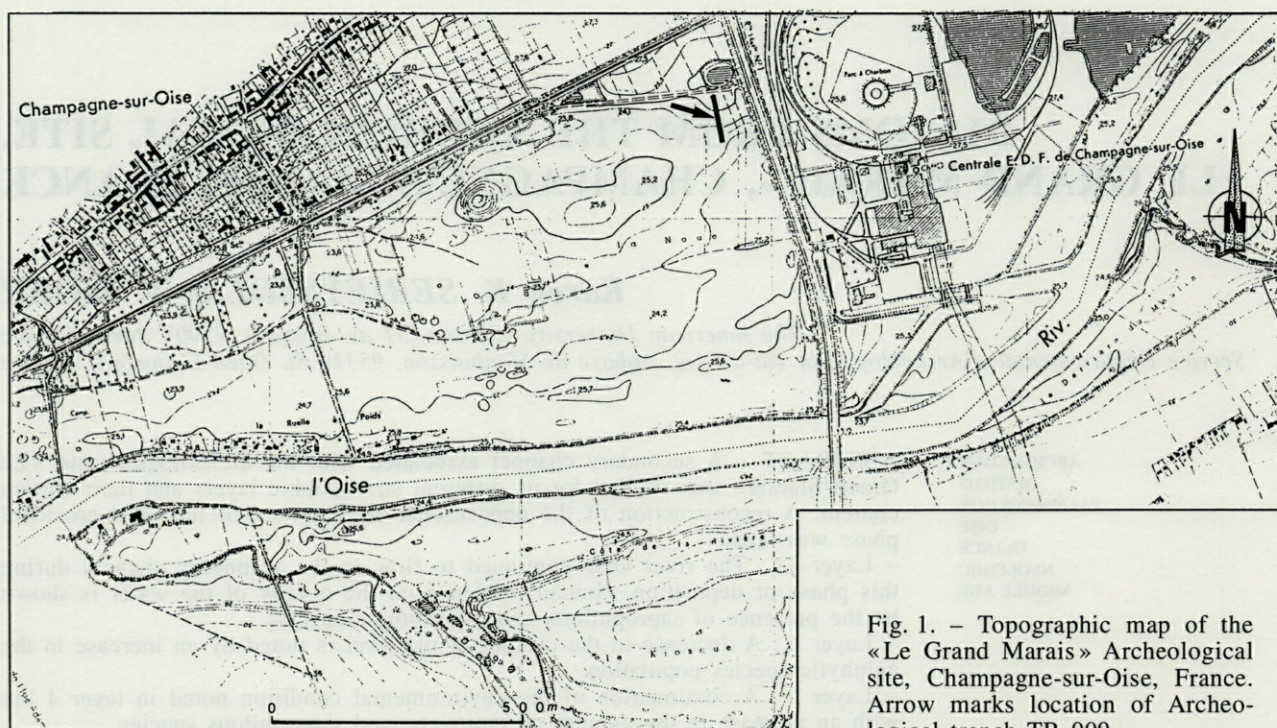


Fig. 1. – Topographic map of the «Le Grand Marais» Archeological site, Champagne-sur-Oise, France. Arrow marks location of Archeological trench TR 009.

A morphological study of the valley in this area shows that the main channel of the Oise flowed in approximately the same position as it does today while a secondary channel existed in the interior of the curve of the Oise river. This secondary channel divided into two branches passing on both sides of a hill composed of sand and gravel. The hill itself has been identified as a medieval feudal motte and is easily recognizable in the area (just west of the site which is marked by an arrow, Fig. 1). The stratigraphic cross-section TR 009 (marked by arrow, Fig. 1) cuts the northern branch of the secondary channel.

Northern Branch Stratigraphy : section TR 009

A 75 meter long trench through the northern branch of the secondary channel was surveyed (Fig. 2). The base of the trench exposes periglacial alluvium composed of green sands and sub-horizontal beds of gravel. This material makes up the mound that separates the secondary channel and it has been reworked creating a layer of reworked gravel mixed with sand. The first erosional phase (layer EP 1, Fig. 2) took place in two areas, one in the bottom of the secondary channel and the other along the northern side of the trench. The northern section was then filled in with a layer of sand, which at times can be slightly loamy, and contains cryoturbation structures indicating its origin in the Weichselian periglacial. These deposits are covered by a dark brown humus rich soil about 20 to 30 cm thick, that could be of Tardiglacial age. It is fossilized by a layer of white or blue plastic mud (layer 3, Fig. 2). This

layer covers the total surface area of the first erosional phase.

The second erosional phase (layer EP 2, Fig. 2) cuts into the first erosional phase especially in the northern branch of the secondary channel. Its channel was then filled by an accumulation of organic remains (branches, leaves, grains) mixed with animal and flint archeological materials. This 30 cm thick layer changes laterally to the north and south sides of the channel into a dark brown loamy soil. The organic remains and soil make up the main archeological layer dated as lower or middle Neolithic and they are covered by a 1.5 m thick deposit composed of blue plastic mud or silt, silty sand and sandy silt.

The third erosional phase cuts through all of the preceding deposits in the axial part of the northern branch. This renewed erosional activity is followed by the deposition of oblique layers of sand and loam (layer 12, Fig. 2). A small renewal of erosional activity cuts this layered deposit. After this, the channel is filled again with a sand mixed with organic materials (layer 11, Fig. 2); fragments of wood, macro-vegetable remains, charcoal, and followed by a layer of plastic loam (layer 4, Fig. 2) very rich in branches of wood and archeological material (worked wood, ceramics, and animal remains) dated as Middle Age.

The final filling of the northern branch of the secondary channel consists of a series of layers, 1.5 m thick, listed in order of deposition : a green plastic sandy loam, a gray brown loam (layer 5, Fig. 2), a yellow loam (layer 6, Fig. 2) with a small hyromorphic horizon, a humus rich black loamy soil which is a few centimeters thick (layer 7, Fig. 2), a gray brown loam (layer 8, Fig. 2), a second small humus rich black loamy

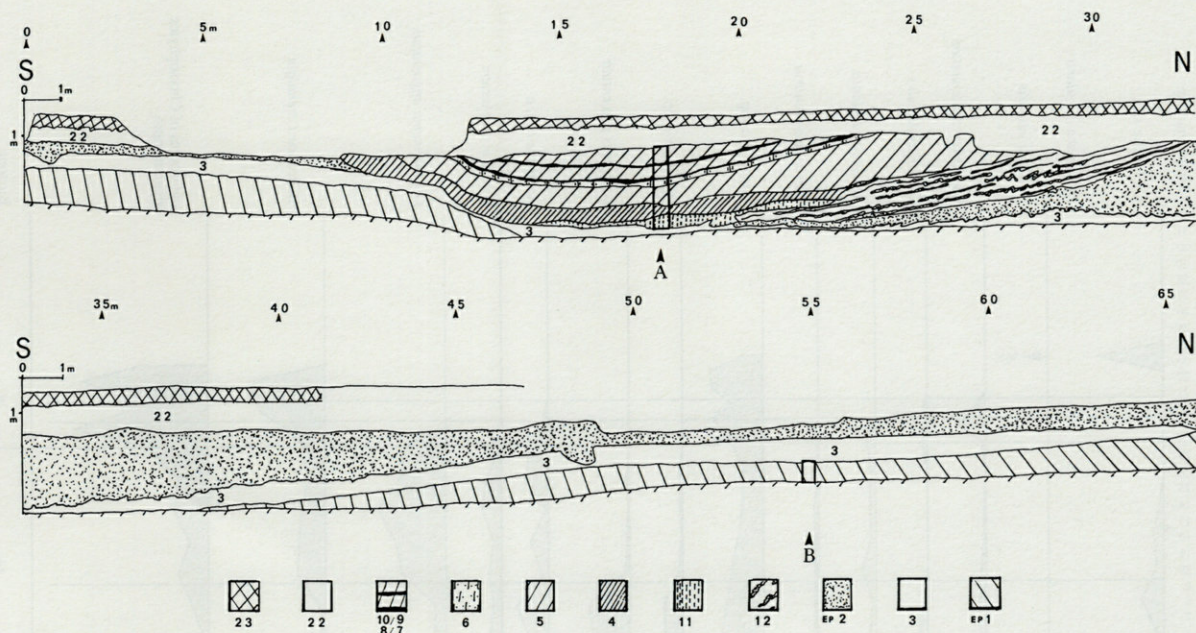


Fig. 2. – Stratigraphic section TR 009 of the northern branch of the secondary channel associated with the archaeological site «Le Grand Marais». EP 1 – first erosional phase, final layer of which is of Tardigracial age; layer 3 – white or blue plastic mud; EP 2 – second erosional phase; layers 12, 11, 4, 5, 6, 7, 8, 9, & 10 – third erosional phase; layers 22 & 23 – surface cover. Explanation in text.

soil (layer 9, Fig. 3) and lastly a gray brown loam containing a horse shoe (layer 10, Fig. 3).

The whole surface area of the site is covered first by a brown loam and then by a humus rich loamy soil, related to agricultural activity in the region.

Diatom samples and their preparation

Due to the low diatoms content in the samples, it was decided to prepare a series of eight samples by using the standard hydrochloric acid (20%) and hydrogen peroxide (30%) technique and then comparing it with a series of the same samples mounted without any chemical treatment. It was found that the non-treated samples contained more diatoms and in better state of preservation than the treated samples. This may be due to the silts and clays present in the sediment. Following the recommendation of Battarbee (1988), «it is safer to make dilute preparations and increase the coverslip area counted.» Therefore, for each sample, a known amount of dry sediment was suspended in a known volume of water and directly mounted on a 8 x 8 mm cover slip without any chemical treatment. After drying over night, the cover slips were mounted with Naphrax. Wherever possible, 300 diatom valves were counted. As for broken diatoms, a choice was made to either count the central areas of a specific species as one valve or two extremities as one valve. The absolute number of diatoms per gram of sediment was calculated. Diatoms identification and ecological information came from R. Fabri (1984), R. Fabri and L. Leclercq (1984), H. Germain (1981), F. Gasse (1980), F. Hustedt (1930), F. Hustedt (1957), K. Krammer and H. Lange-Bertalot (1986-1991), R. Lowe (1974).

A total of 39 samples were taken at ~ 10 cm intervals from two columns. The first column B (Fig. 2; B), was taken from the first erosional phase. These samples contained a lot of sand indicating a high energy environment at the time of sedimentation. From each sample (samples 33 to 39) and using three slides, the entire surface of the covered slip was examined for diatoms but none were found leading to the conclusion that they were sterile. The same can be said for the sterile samples found in column A. The second column A came from the third erosional phase (samples 1 to 32) and certain of these samples contained diatoms.

RESULTS

Layer 11 and Middle Age Archeological layer

Sample 1 was sterile. This might be explained by the fact that the Oise could still have been flowing in this channel. This idea is supported by :

- the presence of sand in the samples indicating a higher energy environment (Straub, 1990);
- the lower numbers of diatom valves per gram of dry sediment found in samples 2 and 3 compared with layers 4 and 5 (Fig. 3);
- the highest percentage of *Cyclotella* (Fig. 3) were identified in this layer even through the two species, *Cyclotella meneghiniana* and *Cyclotella ocellata* are considered to be littoral species; they can live in the plankton;

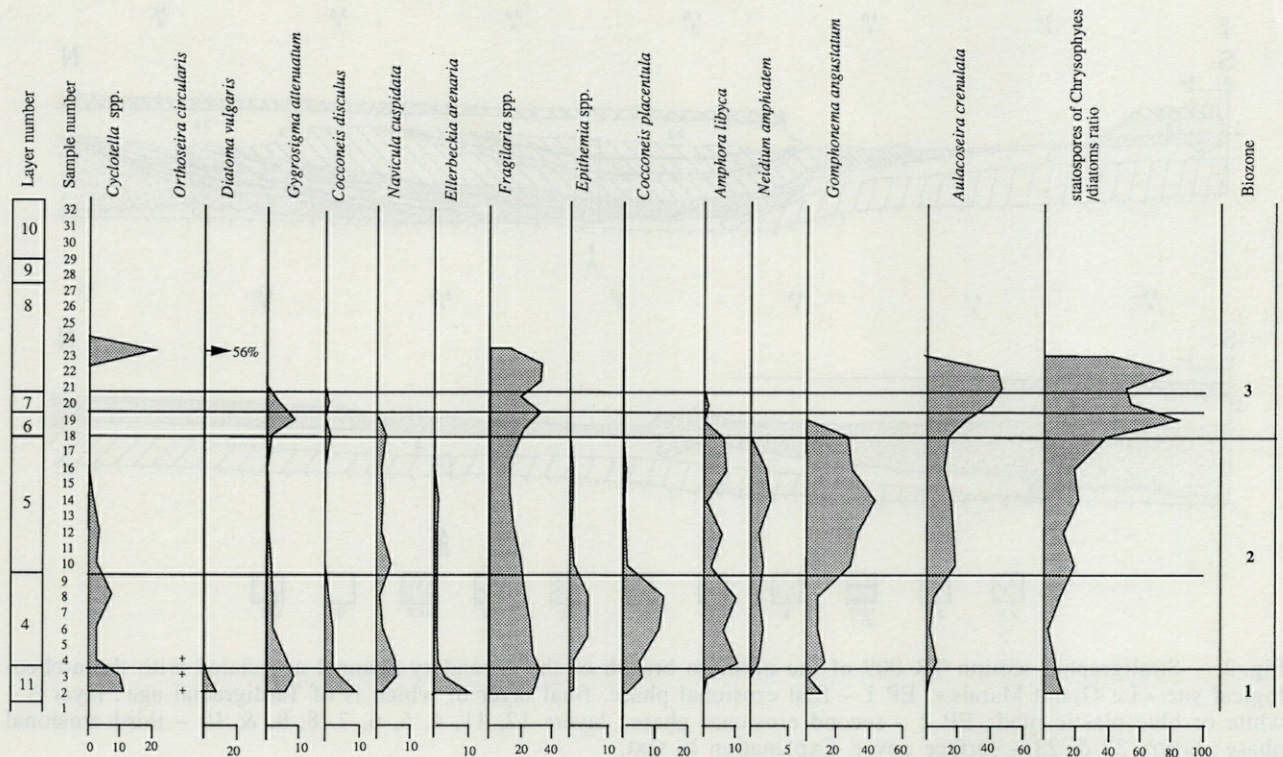


Fig. 3. – Diagram showing the position of the samples in the different sedimentary layers; the vertical variation of the most common diatoms in relative percentage; and the ratio of statospores of Chrysophytes/diatoms in percentage.

— and the presence of *Diatoma vulgaris*, which prefers the littoral with a current (Hustedt (1930).

However, the water depth is probably relatively shallow because not a single species considered to be exclusively planktonic was identified from the layer. This interpretation is supported by the high percentage of *Gyrosigma attenuatum* which are often found in small streams (Germain, 1981) and *Ellerbeckia arenaria* considered to be an aerophilous species which develops in large quantities on rocks situated in ooze and water falls (Krammer and Lange-Bertalot (1986-1991).

It is only in this layer that *Diatoma vulgaris* was identified. According to Fabri (1984), *Diatoms vulgaris* is considered to be a NH_4 and P – saprobiontic species. It was found in the richest and most polluted water of the Amblève and Our basins (Fabris and Leclerq, 1984). However, Hustedt (1957) considered it to be a saproxene species; Sládeček (1973) and Lange-Bertalot (1979) classified it as a beta-mesosaprobic species while Germain (1981) found it not very sensitive to pollution. It seems that *Diatoma vulgaris* can tolerate a certain amount of organic pollution but can not live in very polluted waters. Its presence may be due to an anthropological influence on the water quality.

Layer 4 and Middle Age Archeological layer

The stream current decreases as observed by a change from the previous layer rich in sand to a plastic loam layer and by an increase in the number of valves per gram of sediment. An increase in the percentage of epiphytes (Fig. 4) seem to confirm this hypothesis. The presence of snail shells could explain the high percentage of *Cocconeis placentula* and the lower amounts of *Gomphonema angustatum* as *Cocconeis placentula* is more difficult to eat because it lives flat against the macrophytes while *Gomphonema angustatum* lives attached at one end with the other end extending into the water; thereby *Gomphonema angustatum* is easier to graze on (personal communication, Battarbee).

The pH was calculated using the formula presented by Renberg and Hellberg (1982). The highest pH levels are registered in this layer and the next one (Fig. 4). The increase in pH probably marks an augmentation in primary production, (supported by an increase in epiphytic species) with a corresponding increase in photosynthesis. This in turn would consume carbon dioxide, thereby, increasing the pH. The combination of increased pH and macrophytes can be taken as a sign of increased eutrophication of the water body (personal communication, Ector).

Layer 5

A very similar environment as in the previous layer is observed. The presence of epiphytes reaches its maximum, along with the percentage of saproxene species (species that generally live in a biotope poor in organic compounds) while the percentage of saprophilous species decreases. This change is probably more related to the increase in the number of epiphytes than a change in environmental conditions. Taking into consideration that the final layers of sedimentation of the secondary erosional phase are situated at an altitude about 1.5 meter higher than top of layers 4 and about 1 meter higher than layer 5, it seems feasible to estimate a maximum water depth of about 1 meter.

Layer 6

Layer 6 is marked by a net loss of the epiphyte species, a loss of the aerophilic species, and a net increase in the number of chrysophytes statospores (Fig. 4). The chrysophytes prefer oligotrophic water and were abundant in Canadian lakes before the arrival of man, but with increased anthropological activities their abundance has decreased (Smol, 1985). The number of valves per gram of sediment decreases indicating increase in energy in the environment along with an increase in the benthic and littoral living species, *Aulacoseira crenulata*, *Gryosigma attenuatum*, *Merid-*

ion circulare and *Fragilaria*, that can live in small streams. A small brook may now flow in the channel or it has become a shallow pond.

Layer 7 and 8

The thin Layer 7 is marked by an increase in the number of valve per gram of sediment but this was short lived with a return to figures similar to that of layer 6 for layer 8. The dominant species in Layer 7 and the samples 21 and 22 of layer 8 are the same as those found in Layer 6, therefore, similar environmental conditions.

The domination of *Diatoma vulgare* and *Cyclotella ocellata* in sample 23 along with the small number of valves per gram of sediment seems to indicate a return of the current. This could be explained by sedimentation during periods of flooding. Samples 24 to 32 contained no diatoms.

CONCLUSIONS

Diatom analysis of flood plain sediments can give us a better understanding of natural environment associated with an archeological sites. Anthropological eutrophication is observed in certain layers. A combination of diatom analysis and flood plain morphology can lead to estimations on water depth. In this study, the environment

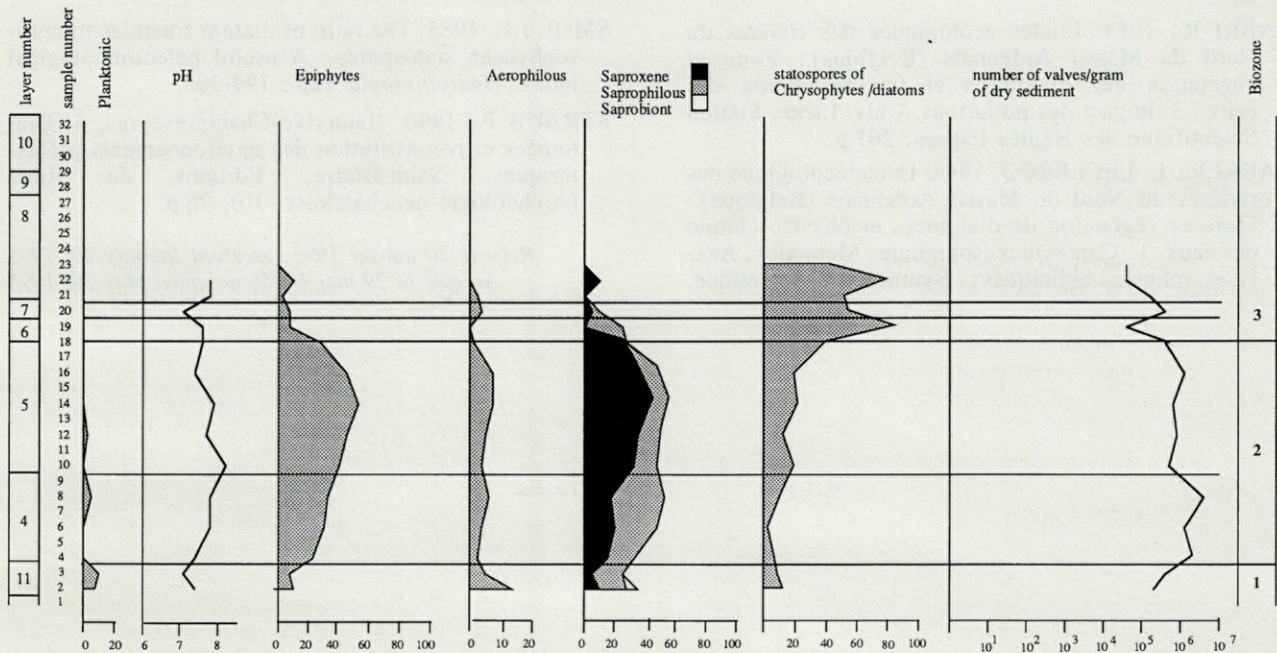


Fig. 4. – Diagram showing the position of the samples in the different sedimentary layers; the estimated pH; the vertical variation of the percentage of epiphytes, aerophile species, and species that are indicators of pollution; the ratio of statospores of Chrysophytes/diatoms in percentage; and the number of valves/gram of dry sediment.

changes as registered by the diatoms during the third erosional phase determined three biozones :

Biozone 1 (Layer 11) – the channel becomes cut off from the main river course.

Biozone 2 (Layers 4 and 5) – a period of major macrophyte development with some anthropological eutrophication. The secondary channel probably have had a maximum water depth of about 1 meter.

Biozone 3 (Layers 6, 7 and lower part of 8) – the final filling of the channel. Clear, higher energy water conditions with less nutrient waters are recorded. A small brook may have continued to flow in the channel. After this, sedimentation probably occurred only during periods of flooding. The land was probably used for agricultural purposes. No marsh or swamp conditions and their associated diatoms were identified. This may indicate that man deliberately drained the site to prevent these conditions from developing. The next sedimentary horizon (Layer 9) which was identified as a humus rich soil seem to confirm this hypothesis.

ACKNOWLEDGEMENT – The Authors would like to thank the anonymous readers for their very constructive remarks.

REFERENCES

- BATTARBEE R.W., 1988. The Use of Diatom Analysis in Archeology : A Review. *J. Archeol. Sci.* **15** : 621-644.
- FABRI R., 1984. Etudes écologiques des rivières du Nord du Massif Ardennais (Belgique) : Flore et végétation des diatomées et physico-chimie des eaux., 3. Impact des pollutions, Univ. Liège, Station Scientifique des Hautes Fagnes, 201 p.
- FABRI R., L. LECLERCQ, 1984. Etude écologique des rivières du Nord du Massif Ardennais (Belgique) : Flore et végétation de diatomées et physico-chimie des eaux. 1. Contexte mésologique ; Méthodes ; Analyses physico-chimiques ; Synthèse taxonomique, écologique et floristique ; Iconographie ; Bibliographie, Univ. Liège, Station Scientifique des Hautes-Fagnes et Départ. bot. 379 p., 33 planches.
- GERMAIN H., 1981. Flore des Diatomées, eaux douces et saumâtres. N. Boubée, Paris, 441 p.
- GASSE F., 1980. Les Diatomées lacustres Plio-Pléistocènes du Gadeb (Ethiopie), Systématique, Paléoécologie, Biostratigraphie. *Rev. Algologique*, mém. h.s. **3** : 349 p.
- HUSTEDT F., 1930. Bacillariophyta (Diatomeae). In Dr. A. Pascher, Die Süßwasser – Flora Mitteleuropas. 466 p. (Reprinted by Koeltz, Koenigstein, Germany, 1976).
- HUSTEDT F., 1957. Die Diatomeenflora des Flußsystems der Weser im Gebiet der Hansestadt Bremen. *Abh. Nat. Ver. Bremen* **34** (3) : 181-440 (Reprinted by Koeltz, Koenigstein, Germany, 1976).
- KRAMMER K. and H. LANGE-BERTALOT, 1986-1991. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Bacillariophyceae. Band 2/1, 2/2, 2/3, 2/4, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart und Jena.
- LANGE-BERTALOT H., 1979. Pollution Tolerance of Diatoms as a Criterion for Water Quality Estimation. *Nova Hedwigia* **64** : 285-304.
- LOWE R.L., 1974. Environmental requirements and pollution tolerance of freshwater diatoms. EPA 670/4-74-005. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 334 p.
- RENNBERG I. & T. HELLBERG, 1982. The pH History of Lakes in Southwestern Sweden, as calculated from the Subfossil Diatom Flora of the Sediments. *Ambio*. **11** : 30-33.
- SLÀDEČEK V., 1973. System of Water Quality from the Biological Point of View. *Arch. Hydrob.* Beiheft 7, Ergebnisse der Limnologie. 218 p.
- SMOL J.P., 1985. The ratio of diatom frustules to chrysophycean statospores : A useful paleolimnological index. *Hydrobiologia* **123** : 199-208.
- STRAUB F., 1990. Hauterive-Champréveyres, 4. Diatomées et reconstitution des environnements préhistoriques. Saint-Blaise, Editions du Ruau (Archéologie neuchâteloise, 10), 96 p.

Reçu le 20 janvier 1995 ; received January 20, 1995
 Accepté le 29 mai 1995 ; accepted May 29, 1995

INVENTORY OF THE DIATOM FLORA OF THE NW MEDITERRANEAN SEA

Z.R. VELÁSQUEZ AND A. CRUZADO

Centre d'Estudis Avançats de Blanes, Camí de Sta. Bàrbara, 17300 Blanes, Spain

DIATOMS
CHECKLIST
MEDITERRANEAN SEA
PHYTOPLANKTON

ABSTRACT – Extensive studies of phytoplankton species diversity from the northwestern Mediterranean Sea have been going on for more than one hundred years. Most of the taxonomic work around the northwestern Mediterranean Sea was carried out between 1925 and 1975 from samples obtained at coastal and inshore stations particularly in the Gulf of Lions, the Ligurian Sea and the Balearic Sea. Although there are an important number of publications covering all the groups of microscopic algae, there is no inventory of the diatom flora of the northwestern Mediterranean. Since 1975 in extenso inventories and checklists of phytoplankton species identified have not been included in the open literature, the authors referring only to the major species or to those offering a special ecological interest. The aim of the present study was to compile published and unpublished data on the composition of phytoplankton taxa from studies carried out since the early days in order to build an up-to-date and comprehensive taxonomic database to assist in the interpretation of the many phytoplankton records obtained in various cruises carried out in the area since 1979. Only the Class Bacillariophyceae has been included in the present paper. For the compilation of the inventory, the 753 taxonomic units (species, varieties and forms), with indication of synonyms, have been grouped within Orders and Suborders. The Inventory has been based on thirty four original bibliographic references and various review papers and atlases. The area studied covers the Gulf of Lions and neighbouring areas with extension to the Catalan Sea. The hydrographic conditions in the areas covered span from the estuarine areas off the Rhône and Ebro rivers to the open sea areas of the Algero-Provençal basin. Species that may have a benthic habitat and those from freshwater and estuarine environments, constituting only a minority, have also been included.

DIATOMÉES
INVENTAIRE
MÉDITERRANÉE
PHYTOPLANCTON

RÉSUMÉ – Les études conduites pendant les cent dernières années sur le phytoplancton de la Méditerranée nord-occidentale ont permis d'élaborer un inventaire de 753 taxons appartenant à la classe des Bacillariophyceae, regroupés en Ordres et Sous-ordres avec indication des espèces, variétés et formes supplémentaires ainsi que les synonymies. L'inventaire est basé sur 34 références bibliographiques regroupant à leur tour d'autres publications sur le même thème. Des observations menées à terme avec des échantillons récoltés lors de plusieurs campagnes océanographiques dans le Golfe du Lion, la Mer Catalane et leurs abords font aussi partie de l'inventaire.

INTRODUCTION

Early investigations on the taxonomy of phytoplankton carried out by Gourret (1883) in the Gulf of Marseilles were followed by those of Peragallo and Peragallo (1908) who provided for the first time a list of Diatom species found in the Gulf of Lions and, almost at the same time, Pavillard (1909; 1916a,b,c) identified 50 species of diatoms from the Gulf of Lions and the Ligurian

Sea. Dangeard (1932) published the systematics of phytoplankton collected near Banyuls-sur-Mer between 1925 and 1932 including 53 species of diatoms. Devèze (1959) reported a study carried out in the Gulf of Marseilles during the period 1955-1956 with 57 species of diatoms identified by Margalef. Cachon and Cachon-Enjumet (1964) described two new species from plankton sampled off Villefranche-sur-Mer. Minas *et al.* (1968) on the COMEXO laboratory-buoy located in the bay of Villefranche-sur-Mer, cited 43 systematic units

of diatoms during their study of the microplankton and environmental conditions. Leger (1971) published a paper on the phytoplankton collected from that same buoy, this time anchored offshore, in the Gulf of Lions.

Until the beginning of the 1960s, all the work was carried out with samples obtained by towing a fine-meshed net. A. Travers (1962) and M. Travers (1962) simultaneously used the traditional net sampling and the new Utermöhl technique to study the phytoplankton of the Gulf of Marseilles between 1961 and 1962. As a result of their parallel work with both techniques, A. Travers (1962) published a systematic inventory including 203 diatom species while M. Travers (1962) focused on the quantitative aspects and both authors made an important contribution to the methodology and ecology of the phytoplankton of the Mediterranean Sea. This work was followed by the publication of an inventory of Protists of the Gulf of Marseilles (M. Travers, 1975) constituting perhaps the most exhaustive work ever done on the subject that has been used as the basis for our work.

The early work of Massuti (1930, 1944) in the bay of Palma de Mallorca and in Castellon was reviewed by Margalef (1951) together with that carried out by Dangeard in the French Catalonia as well as his own observations from Blanes and Castellon. Margalef (1969, 1971) and Margalef and Estrada (1987) have compiled the species found by various authors working along the Catalan coasts in locations such as the bays of Blanes (Margalef, 1945b), Cadaqués (Margalef, 1945a) and Palma de Mallorca (Balle, 1953, 1954, 1959; Navarro and Massuti, 1940), the ports of Barcelona (Morales and Arias, 1965; Margalef and Herrera, 1966) and Maho (Massuti, 1948) and coastal areas off Castelló (Herrera and Margalef, 1957, 1961; Margalef and Herrera, 1963, 1964; Margalef, 1969), Barcelona (Margalef and Ballester, 1967; Margalef and Castellvi, 1967; Margalef, 1969, 1971; Estrada, 1979, 1980, 1987) and the Ebro delta (Lopez and Arté, 1972). These authors listed 119 diatom species. Blasco (1970a,b), on the other hand, studied the systematics of *Chaetoceros didymus* and *Hemidiscus hardmanianus* Grev. and Castellvi (1963) focused on *Skeletonema costatum*.

Since 1975, in extenso inventories and checklists of phytoplankton species identified are not included in the scientific literature, the authors referring only to the most frequently observed species or to those offering a special ecological interest. Nevertheless, taxonomic information may be found in various publications (Estrada, 1979; Delgado, 1986; Descy and Willems, 1991) referring to the phytoplankton communities studied along both the Spanish coasts (Catalan and Balearic seas) and the French coasts (Gulf of Lions, Gulf of Marseilles).

A number of papers have collected and synthesized the knowledge available. Massuti and Margalef (1950), in the book «Introducción al estudio del fitoplancton marino» offered a valuable guide for the identification and systematic classification of some important marine phytoplankton species because of their abundance. Tregouboff and Rose (1957) handbook of planktonology of the western Mediterranean, based on 27 years of studies in the region, contains 227 plates and 2200 figures. Rampi and Bernhard (1978) produced an identification key for the Mediterranean pelagic diatoms with 28 genera and 126 species. More recently, Delgado and Fortuño (1990) published an atlas of Mediterranean phytoplankton containing 45 plates with electron micrographs of diatoms. However, no attempt has been made so far to compile a checklist of the phytoplanktonic flora of the northwestern Mediterranean following modern taxonomic criteria. Not all the authors having made contributions to the knowledge of phytoplankton of the NW Mediterranean are referred to here as their works had been included in one or another of these reviews. On the other hand, other authors contributors to the present work are referred to in the inventory.

The aim of the present study is part of an effort to compile the information available on the composition of the 12 most abundant Classes of phytoplankton in the NW Mediterranean (only the Class Bacillariophyceae is included in the present paper) from studies published since the early days and work done by the authors in the course of various oceanographic cruises carried out in the area during the last fifteen years.

MATERIAL AND METHODS

Two different sources of information were used for the preparation of the Inventory, (a) the taxa quoted in published references since 1883 (see list of references) and (b) those deriving from microscopic observations (following the Utermöhl technique) carried out in samples obtained from a number of cruises between 1979 and 1992 (Table I). Figure 1 shows the location of the stations visited during these cruises (Cruzado and Velásquez, 1990; Velásquez and Cruzado, 1990).

The bibliographic references consulted include review papers, especially the exhaustive work carried out by M. Travers (1975), which provided most of the taxa including synonyms, and by Margalef and Estrada (1981), and a number of unpublished reports and personal communications. Whenever possible, original sources have been consulted.

Volume 2 of Sournia's atlas of marine phytoplankton (Ricard, 1987) and the book by Round *et al.* (1990) have been used for the taxonomic classification.

The information presented here is part of a computer database developed in order to facilitate the interpreta-

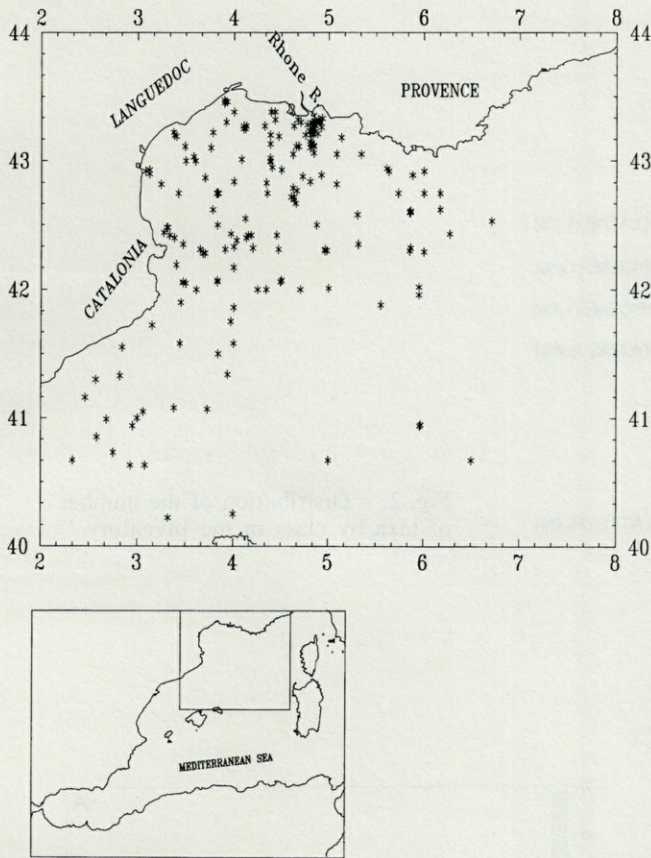


Fig. 1. – Map showing the area covered by the study and position of the stations sampled during the cruises.

Table I. – Oceanographic cruises covered by the present work.

Cruise	Date	Project	Funding
TANIT 79	5-11 Aug 1979	TANIT	CAICYT
CARON 85	25-28 Feb 1985	CARON	CAICYT
PELAGOLION III	10-15 Mar 1988	PICS	CSIC/CNRS
PANACHE I	10-15 Mar 1988	FRONTAL	CNRS
PANACHE II	6-19 Nov 1988	FRONTAL	CNRS
DISCOVERY 88	12-26 Dec 1988	EROS 2000	CEC
TYRO 91	20 Nov-5 Dec 1991	EROS 2000	CEC

tion of many phytoplankton records, including bibliographic references, complemented with optical and electron microscope images as well as descriptive and ecological information. The data constitute the knowledge base for an expert system at present at the pilot stage (Velásquez *et al.* 1991).

PRESENTATION OF THE INVENTORY

The taxonomic units, at the level of species, variety and form, all belonging to the Class Bacillariophyceae, have been grouped within Orders and Suborders fol-

lowing Ricard (1987). A number in chronological order (in brackets after each taxon) was assigned to each of the bibliographic references on which this work is based (Table II). The studies from the Gulf of Marseilles published prior to 1975 are referenced as Travers (1975) (reference = 0) instead of the original ones.

Many species have been cited by the original authors with names different from those accepted at present. An effort has been made to adapt the original citations to the most recently accepted systematics and, whenever possible, synonyms have been indicated (by an = sign). Some of the taxa may not reflect the state of the art with regard to the ever-changing taxonomical and systematic knowledge.

Most of the work included in this Inventory refers to organisms collected in the marine planktonic domain. However, species that may have a benthic habitat and also those that appear in the estuarine areas near the Rhône and Ebro rivers have also been included. The difficulty to define the term planktonic (vs. benthic and/or epiphytic), particularly in the estuarine and littoral areas (ecotones) has been acknowledged by Ricard (1987). In such habitats, the local populations are often formed by allochthonous organisms originating in either continental or oceanic systems and may be due to organisms showing tycho planktonic characters. Accordingly, the habitat(s) given by Ricard (1987) to each genus has been represented in the Inventory by a letter (*P* = Planktonic; *B* = Benthic; *E* = Epiphytic; *T* = Tycho planktonic). Those genera not showing any of the above letters are considered only Planktonic. It must be noted, however, that individual species, within any given genus, may show one or other behaviour.

Table II. – Key to the references in the Inventory.

0. Travers, M (1975)	16. Margalef, R (1965)
1. Massuti, M (1930)	17. Jacques, G (1967, 1969)
2. Dangeard, P (1932)	18. Margalef, R (1969)
3. Margalef, R (1945a)	19. Blanc, F <i>et al.</i> (1969)
4. Navarro, FP; Bellon Uriarte, F (1945)	20. Margalef, R (1971)
5. Margalef, R (1945b)	21. Blanc, F <i>et al.</i> (1975)
6. Margalef, R (1951)	22. Bourgade, B (1977)
7. Morales, E (1952)	23. Estrada, M (1979)
8. Balle, P (1953)	24. Estrada, M (1980)
9. Morales, E (1956)	25. Kim, KT (1980)
10. Margalef, R (1957)	26. Arfi, R <i>et al.</i> (1982)
11. Margalef, R; Morales, E (1960)	27. Margalef, R; Estrada, M (1987)
12. Herrera, J; Margalef, R (1961)	28. Delgado, M (1987)
13. Margalef, R; Herrera, J (1963a)	29. Palau, M <i>et al.</i> (1991)
14. Margalef, R; Herrera, J (1963b)	30. Estrada, M (1991)
15. Margalef, R (1964)	31. Delgado, M (Personal Comm.)
	32. Estrada, M. (Personal Comm.)
	33. Margalef, R (Personal Comm.)
	34. Velásquez, ZR (this work)

RESULTS

The checklist contains 753 taxa (species, varieties and forms) belonging to 104 genus of diatoms. Of these taxa, 199 are varieties or supplementary forms. A total of 249 taxa belong to the Order Centrales and 504 to the Order Pennales of which 20 taxa could not be accommodated

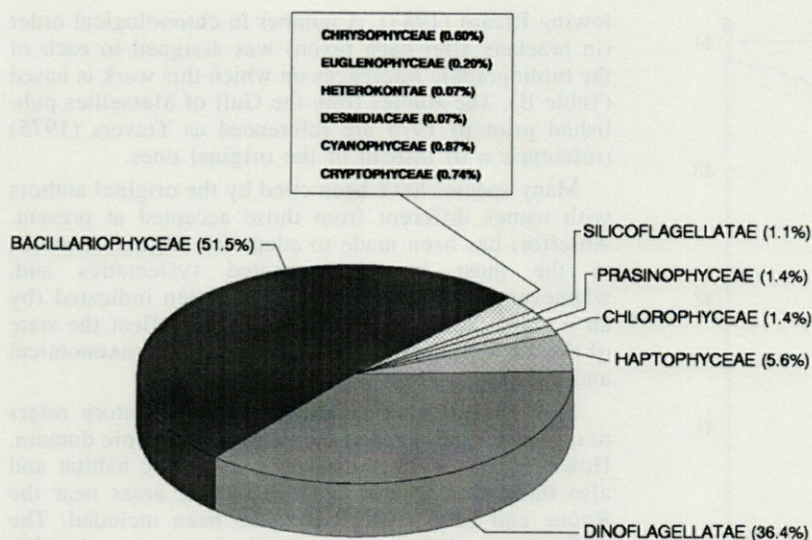


Fig. 2. – Distribution of the number of taxa by class in the Inventory.

to the classification given by Ricard (1987) and had to be listed according to Round *et al.* (1990) except for the genus *Amphiprora* that was absent from both keys but was cited by Cupp (1943). Fifty two synonyms, commonly used by many authors, were included in the inventory. Of the 248 genera given by Ricard(1987), 71 (34 belonging to Centric and 37 to Pennate diatoms) were never cited in the area studied. They have however been included in the Inventory for completion.

Figure 2 shows the importance of the Bacillariophyceae (> 51 %) when compared to the overall species composition of the phytoplankton of the NW Mediterranean, followed by the Dinoflagellatae (> 36 %). All other groups only account for less than 13 % with the Haptophyceae representing nearly 6% and the Chlorophyceae, Prasinophyceae and Silicoflagellatae each representing just above 1% of the total number of taxa.

There is a relatively low degree of coincidence amongst the various authors citing the various species (Fig. 3A). A large part of the taxa (68 %) were cited only by one author while only 10 – 15 % of the taxa have been cited by more than five authors. The compilation made by Travers (1975) of the phytoplankton of the Gulf of Marseilles contributes with most of the species in the checklist citing 422 species that have not been cited again by the phytoplankton workers in the region. Ninety nine species were first cited outside the Gulf of Marseilles, most of them after 1967 (Fig. 3B). Table III shows the most frequently cited taxa, listed in order of citation (by more than 17 authors).

Of the total number of taxa in the checklist (753), about 20 % are varieties and 5 % synonyms (Fig. 4A) much fewer than the results shown at the level of genus from Ricard (1987) with 46.4 %

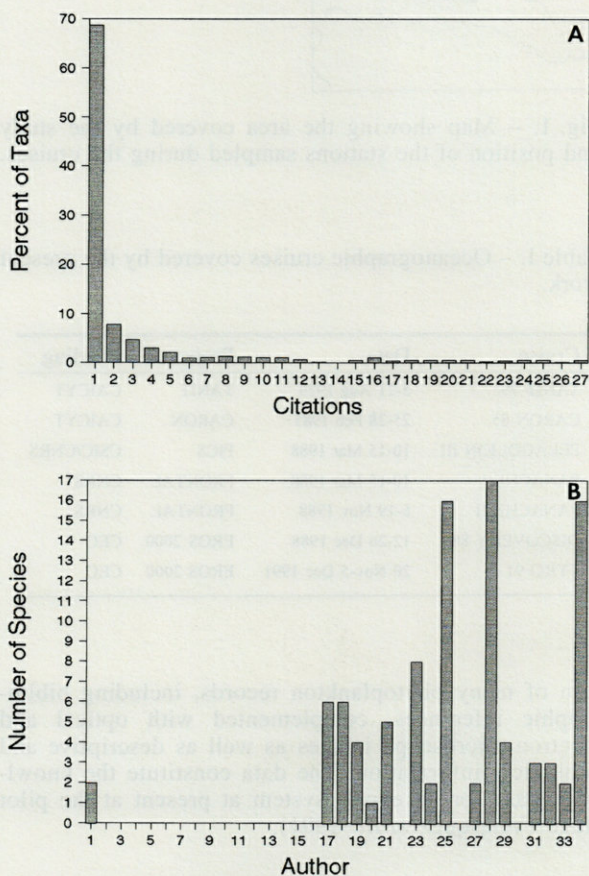


Fig. 3. – A, Distribution of taxa according to the number of citations made in the sources of reference. B, Number of taxa newly recorded in the region (since 1967) according to the author (see Table I for a reference to the authors code).

Table III. – Most of the taxa.

Taxon	Citations
<i>Asterionella japonica</i> Cleve in Cleve and Möller (= <i>A. glacialis</i> Castracane)	27
<i>Thalassionema nitzschioides</i> Grunow ex Hustedt (= <i>Thalassiothrix nitz.</i>)	27
<i>Chaetoceros curvisetus</i> Cleve	27
<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve	27
<i>Rhizosolenia stolterfothi</i> H. Peragallo	26
<i>Dactyliosolen mediterraneus</i> H. Peragallo (= <i>D. bergoni</i> H. Peragallo)	25
<i>Hemiaulus haucki</i> Grunow in Van Heurck	25
<i>Nitzschia pungens</i> Grunow in Cleve and Möller (= <i>N. seriata</i>)	25
<i>Thalassiothrix frauenfeldi</i> (Grunow) Cleve and Möller	25
<i>Cerataulina pelagica</i> (Cleve) Hendey (= <i>C. bergoni</i> H. Peragallo)	24
<i>Chaetoceros decipiens</i> Cleve (+ f. <i>singularis</i> Grant)	24
<i>Rhizosolenia alata</i> Brightwell (f. <i>alata</i>)	24
<i>Rhizosolenia calcar-avis</i> Schultze	24
<i>Chaetoceros affinis</i> Lauder (v. <i>affinis</i> Cleve)	23
<i>Chaetoceros peruvianus</i> Brightwell (v. <i>peruvianus</i>)	23
<i>Guinardia flaccida</i> (Castracane) H. Peragallo	23
<i>Biddulphia mobiliensis</i> (Bailey) Grunow in Van Heurck (= <i>Odontella mobiliensis</i>)	22
<i>Schroederella delicatula</i> (H. Peragallo) Pavillard (+ <i>S. schorederi</i> (Bergon) Pavillard)	22
<i>Bacteriastrum delicatulum</i> Cleve	21
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) W. Smith (= <i>Nitzs. closterium</i>)	21
<i>Rhizosolenia delicatula</i> Cleve	21
<i>Rhizosolenia fragilissima</i> Bergon	21
<i>Chaetoceros lorenzianus</i> Grunow	20
<i>Lauderia annulata</i> Cleve (= <i>L. borealis</i> Grant)	20
<i>Nitzschia lineola</i> Cleve (= <i>N. delicatissima</i> Cleve)	20
<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve (= <i>Stephanopyxis costata</i> (Greville) Hustedt)	20
<i>Chaetoceros didymus</i> Ehrenberg (v. <i>didymus</i>)	19
<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i> Mangin	19
<i>Chaetoceros rostratus</i> Lauder	19
<i>Hemiaulus sinensis</i> Greville	19
<i>Nitzschia longissima</i> (Brébisson in Kützing) Ralfs in Pritchard (v. <i>longissima</i>)	18

of synonyms (Fig. 4B). The varieties (Fig. 4C) are most frequent in the genera *Nitzschia* (18.1%), *Navicula* (17.1%), *Amphora* (9.5%), *Chaetoceros* (6.5%) and *Diploneis* (6.5%) (Fig. 4). Many species (22.8%) have only one synonym (Fig. 4D) while a large number of them have up to 5 synonyms (47.4%). The genera *Chaetoceros* (19.3%) and *Navicula* (10.5%) show the largest number of synonyms.

The genera with larger number of species also show the larger number of varieties (Fig. 5A) and of synonyms (Fig. 5B) in roughly constant proportions.

DISCUSSION

The checklist given in the present paper is the result of more than one hundred years of work of a considerable number of phytoplankton taxonomists and ecologists working in the NW Mediterranean Sea. Some of these scientists have made a very substantial contribution to the Taxonomy and Ecology of phytoplankton. A number of species were first identified in samples from this region and their original description is still being used by marine biologists around the world.

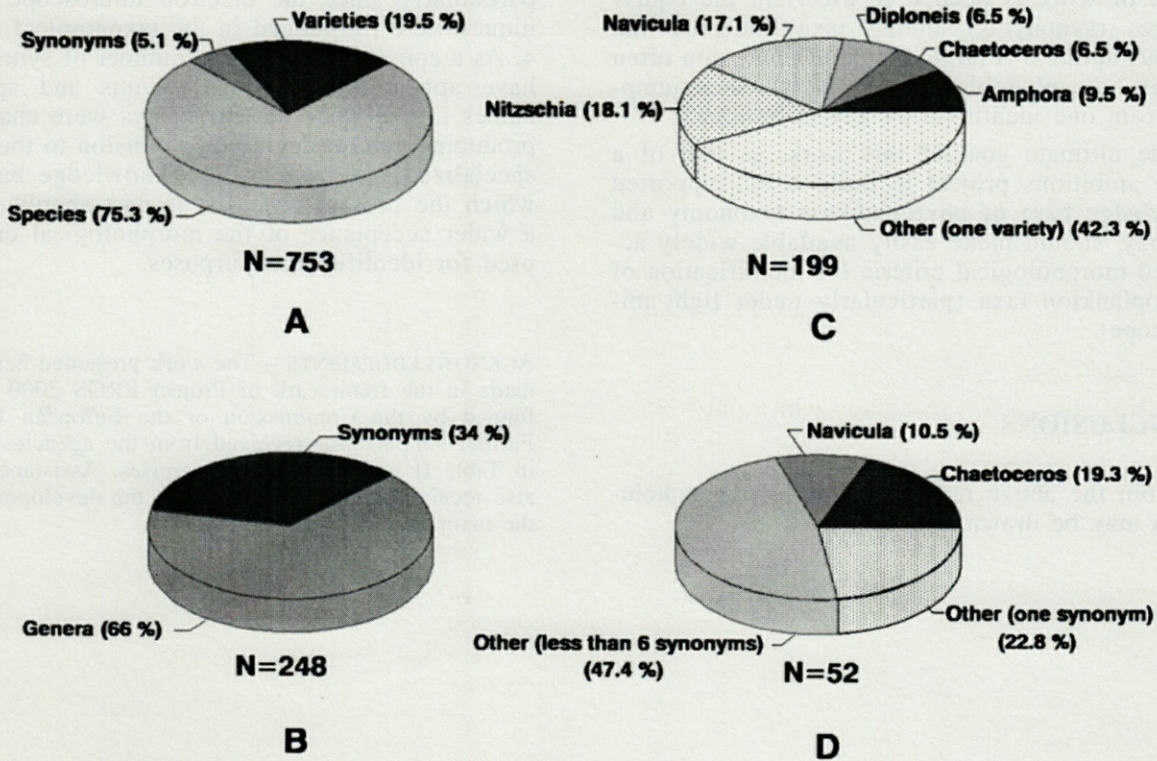


Fig. 4. – (A) Distribution of taxa in species, synonyms and varieties. (B) Proportion of synonyms in relation to genera (as given by Ricard, 1987). (C) Distribution of varieties according to genera. (D) Distribution of synonyms according to genera.

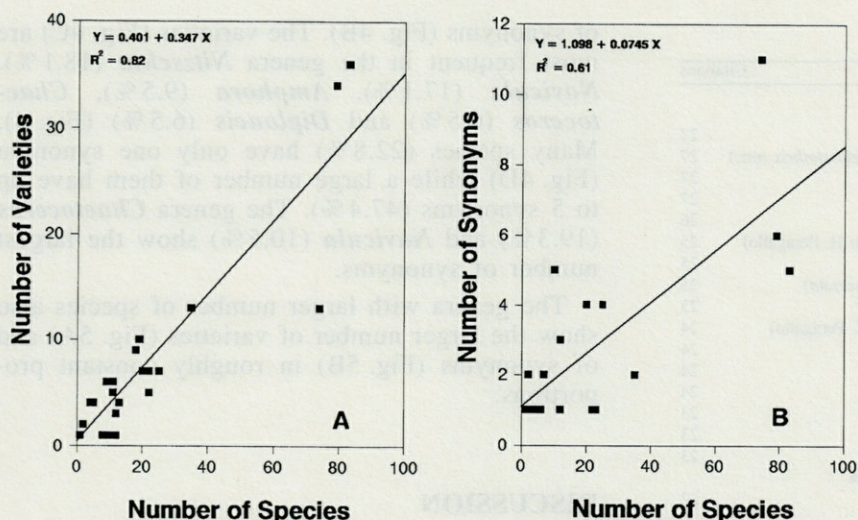


Fig. 5. – Number of varieties (A) and number of synonyms (B) in relation to the number of species for the various genera.

The greater precision introduced in the taxonomy of diatoms by the electron microscopy observations challenges the original identification thus making some taxa to appear and other disappear. The analysis of the references gives support to such a statement although a purely statistical, superficial assessment, could give birth to the idea of species extinction and appearance. A lot of work is needed to ascertain the equivalences (synonyms) among taxa cited by the various authors. A large degree of confusion often assaults the phytoplankton biologist when jumping from one identification key to another.

The ultimate goal of this work, as part of a more ambitious project to build a PC-supported knowledge base of phytoplankton taxonomy and ecology, should make easily available widely accepted morphological criteria for identification of microplankton taxa (particularly under light microscope).

CONCLUSIONS

From the above results, the following conclusions may be drawn :

- 1, The taxonomic identification of phytoplankton in the Northwestern Mediterranean has been mostly done before 1967.
- 2, Very few species have been added since the consolidated checklist published by Travers for the Gulf of Marseilles. The most recent additions are mainly unpublished work.
- 3, The classification keys used by the various authors are far from being homogeneous particularly since the electron microscope techniques were introduced in the taxonomical work.
- 4, As a consequence, a large number of synonyms have appeared when many genus and species names in use since the early days were changed, producing certain degree of confusion to the non-specialized biologist.
- 5, The knowledge base of which the present checklist is part should allow a wider acceptance of the morphological criteria used for identification purposes.

ACKNOWLEDGEMENTS – The work presented here was made in the framework of Project EROS 2000 partly funded by the Commission of the European Union. Further support was received from the agencies listed in Table II which funded the cruises. Assistance was also received from UNEP/FAO for the development of the taxonomic data base.

INVENTORY

CLASS BACILLARIOPHYCEAE

Order Centric Schütt, 1896

Suborder Coscinodiscineae

COSCINODISCUS Ehrenberg, 1838

Coscinodiscus alborani (6,7,18), *C. asteromphalus* (0,11,18,34), *C. centralis* (v. *pacifica*) (0), *C. centralis* (v. *centralis*) (0,2,6,7,9,11,17,18), *C. concinnus* (0,8,17,34), *C. curvatus* (0), *C. excentricus* (2,6,7,9,11,12,13,14,15,17,18), *C. gigans* (6,9,11,12,18,22,28), *C. grani* (0,17,22,28,34), *C. janischi* (10,14,15,18), *C. lineatus* (0,6,7,8,10,11,14,15,18,34), *C. marginatus* (0,34), *C. nitidus* (= *C. scintillans*) (0,34), *C. nodulifer* (0,25), *C. oculus-iridis* (0,6,7,9,11,18,25,34), *C. perforatus* (v. *perforatus*) (0,17,18,22), *C. perforatus* (v. *cellulosa*) (0), *C. perforatus* (v. *pavillardii*) (0,2,6,7,9,10,11,12,14,15,17,18,25), *C. radiatus* (0,6,7,10,11,12,13,14,15,16,17,18,21,22,25,30,34), *C. sp* (1,5,7,9,11,13,14,15,20,23,24,25,26,28,30,34), *C. subtilis* (0), *C. stellaris* (34), *C. thorii* (6,7,9,18).

GOSSLIERIELLA Schütt, 1893

Gossleriella tropica (0,1,6,7,10,11,18).

HEMIDISCUS Wallich, 1860

Hemidiscus cuneiformis (v. *ventricosa*) (0), *H. cuneiformis* (v. *recta*) (0), *H. cuneiformis* (v. *gibba*) (0), *H. cuneiformis* (v. *cuneiformis*) (6,10,11,12,14,18,22,24,29,30,34).

Euodia cuneiformis (1).

ROPERIA Grunow, 1881

ACTINOCYCLUS Ehrenberg, 1837

Actinocyclus ehrenbergi (v. *tenella*) (0), *A. ehrenbergi* (v. *ehrenbergi*) (0), *A. normani* (0).

ASTEROLAMPRA Ehrenberg, 1844

Asterolampra grevillei (0,2,6,7,10,11,12,14,15,17,18,34), *A. marylandica* (2,6,7,9,10,11,2,14,17,18,34), *A. vanheurcky* (6,10,18).

ASTEROMPHALUS Ehrenberg, 1844

Asteromphalus flabellatus (0,28), *A. heptactis* (18,23), *A. hookeri* (0), *A. robustus* (0,14,18).

BRIGHTWELLIA Ralfs, 1861 (O,N,P)

ACTINOPTYCHUS Ehrenberg, 1843

Actinoptychus senarius (= *A. undulatus*) (0), *A. splendens* (0)

AULACODISCUS Ehrenberg, 1884

THALASSIOSIRA Cleve, 1873

Thalassiosira condensata (25), *T. decipiens* (+ *T. kryophila*) (0), *T. decipiens* (+ *Cosc. eccent. fasc.*) (0,6,7,17,18,22,25), *T. eccentrica* (v. *eccentrica*) (0,27,29), *T. eccentrica* (= *Cosc. eccent. ecce.*) (0), *T. mediterranea* (= *Coscosira medit.*) (0), *T. nordenskiöldi* (0), *T. parva* (17), *T. polychorda* (= *Coscosira polychorda*) (0), *T. rotula* (0,17,18,24,26,34), *T. sp*

(10,11,20,23,24,26,28,29,30,34), *T. subtilis* (6,10,11,18), *Coscosira polychorda* (17).

MINIDISCUS Hasle, 1973

BACTERIOSIRA Gran, 1900

POROSIRA (Grunow) Jorgensen, 1905

PLANKTONIELLA Schütt, 1893

Planktoniella sol (0,7,9,10,17,18,34).

CYCLOTELLA Kutzing, 1833

Cyclotella caspia (0,16,17,18), *C. catenata* (21), *C. comta* (0,25), *C. glomerata* (25), *C. kuetzingiana* (0), *C. melosiroides* (25), *C. meneghiniana* (0,28), *C. ocellata* (0), *C. operculata* (25), *C. sp* (20,21,22,25,29).

CYCLOSTEPHANOS Round, 1982

STEPHANODISCUS Ehrenberg, 1845

Stephanodiscus hantzschii (0,22).

SKELETONEMA Greville, 1865

Skeletonema costatum (= *Stephanopyxis costatum*), (0,6,7,8,10,11,15,16,17,18,20,21,22,23,24,25,26,28,29,34).

CYMATODISCUS Hendey, 1958

CYMATOTHECA Hendey, 1958

TRYBLOPTYCHUS Hendey, 1958

DETONULA (Castracane) Schütt, 1983

Detonula confervacea (18), *D. moselyana* (34), *D. pumila* (31).

LAUDERIA Cleve, 1873

Lauderia annulata (= *L. borealis*) (0,2,6,7,8,9,10,11,12,15,17,18,20,22,23,24,25,26,28,34).

Schroederella delicatula (+ *S. schroederi*) (0,1,2,6,7,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,22,24,25,28,29,30,34).

BT MELOSIRA Agardh, 1824

Melosira arenaria (0), *M. distans* (0), *M. granulata* (0,21,28,29,34), *M. granulata* (v. *angustissima*) (21), *M. italica* (22), *M. juergensi* (13,19), *M. juergensi* (v. *subangularis*) (0,18), *M. moniliformis* (v. *moniliformis*) (0,28), *M. moniliformis* (v. *subglobosa*) (0), *M. nummuloides* (21), *M. roeseana* (21), *M. sp* (34), *M. sulcata* (18,29), *M. varians* (19,21,22,29).

B PARALIA Kutzing, 1844

BT DRURIDGEA Donkin, 1861

BT Podosira Ehrenberg, 1840

Podosira stelliger (18).

ENDICTYA Ehrenberg, 1845

STEPHANOPYXIS (Ehrenberg) Grunow, 1884

Stephanopyxis palmeriana (8,18,34), *S. sp* (0,34), *S. turris* (1).

BT HYALODISCUS Ehrenberg, 1845

Hyalodiscus radiatus (0), *H. scoticus* (0).

BT PYXIDICULA Ehrenberg, 1833

Suborder Rhizosoleniineae

RHIZOSOLENIA Brightwell, 1858

Rhizosolenia acuminata (2,7,8,9,17), *R. bergoni* (0,2,6,7,8,11,15,17,18), *R. castracanei* (0,2,6,7,8,9,10,11,12,14,17,18), *R. cylindrus* (0,18,25), *R. delicatula* (0,6,7,8,9,10,11,12,13,14,16,17,18,20,21,22,23,24,25,28,34), *R. firma* (12,18), *R. fragilissima* (0,6,7,8,9,10,11,14,16,17,18,19,20,21,23,24,25,26,28,29,34), *R. hebetata* (f. *semispina*) (0,1,2,6,7,8,10,11,12,13,14,18,25,26,29), *R. hebetata* (f. *hebetata*) (0,9,22,23,24,34), *R. imbricata* (v. *shrubsolii*) (0,1,2,6,7,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,20,25,29), *R. robusta* (= *R. sigma*) (0,1,2,5,6,10,11,12,13,14,15,16,17,18,22,28,29,34), *R. setigera* (= *R. hensenii*) (0,17,18,21,22,23,25,28,29), *R. sp* (5,23,24,25,30), *R. stouterfothi* (0,1,2,5,6,7,8,9,10,11,13,14,15,16,17,18,19,20,22,23,24,25,26,28,29,34), *R. styliformis* (v. *polydactyla*) (0), *R. styliformis* (= *R. formosa*) (0), *R. styliformis* (v. *longispina*) (0), *R. styliformis* (v. *styliformis*) (0,6,7,9,18,19,21,25,26,34), *R. styliformis* (= *R. styl. latissima*) (0), *R. temperei* (v. *temperei*) (0,2,6,7,10,11,12,13,14,17,18), *R. temperei* (v. *acuminata*) (0,6,10,11,14,18).
Pseudosolenia calcar-avis (= *Rhizosolenia calcar-avis*) (0,1,2,3,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,22,24,25,28,29,33,34).

DACTYLIOSOLEN Castracane, 1886

Dactyliosolen mediterraneus (= *Leptocylindrus med.*) (= *D. bergoni*) (0,2,5,6,7,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,22,23,24,25,26,28,29,34).

GUINARDIA H. Peragallo, 1892

Guinardia blavyana (0,2,6,7,9,18), *G. flaccida* (0,1,2,3,5,6,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,22,24,25,26,29,34), *G. fragilissima* (33).

LEPTOCYLINDRUS Cleve, 1889

Leptocylindrus danicus (0,1,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,20,21,22,23,24,25,26,28,29,30,34), *L. minimus* (0,17,18,19,21,28,34), *L. sp* (21).

CORETHRON Castracane, 1886

Corethron criophilum (= *C. hystrix*) (0,10,11,17,18,22,26,29,34), *C. pelagicum* (17).

Suborder Biddulphiineae

BT BIDDULPHIA Gray, 1821

Biddulphia alternans (18,34), *B. aurita* (0,8,25), *B. longicruris* (v. *longicruris*) (0,22), *B. mobiliensis* (= *Odontella mobiliensis*) (0,2,6,7,9,10,11,12,13,14,15,17,18,20,22,23,24,25,26,28,29,34), *B. pelagica* (= *Triceratium pelagicum*) (0), *B. pulchella* (= *B. biddulphiana*) (0,8,18,22), *B. regina* (0), *B. rhombus* (0), *B. schroederiana* (0,5,18), *B. sinensis* (0), *B. sp* (1, 11,28), *B. tridens* (0).

BBIDDULPHIOPSIS von Stosch & Simonsen, 1984

ANAULUS Ehrenberg, 1844

Anaulus minutus (0), *A. sp* (29).

EUNOTOGRAMMA Weisse, 1854

HYDROSERA Wallich, 1858

BT ISTHMA Agardh, 1832

TERPSINOE Ehrenberg, 1843

BT TRIGONIUM Cleve, 1868

HEMIAULUS Ehrenberg, 1844

Hemiaulus haucki (0,1,2,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,21,22,23,25,26,29,34), *H. membranaceus* (28), *H. sinensis* (0,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,24,25,28,34), *H. sp* (= *H. haucki/membranaceus*?) (27).

ATTHEYA West, 1860

CERATAULINA H. Peragallo ex. Schütt, 1896

Cerataulina pelagica (= *C. bergoni*) (0,1,2,6,7,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,20,22,23,24,26,28,29,31,34).

CLIMACODIUM Grunow, 1868

Climacodium fraunfeldianum (0).

EUCAMPIA Ehrenberg, 1939

Eucampia cornuta (0,17,18,24,28), *E. zodiacus* (0,1,8,12,13,14,15,17,18,20,22,24,25, 26,28,34).

BT STICTODISCUS (Ehrenberg) Greville, 1861

ARACHNOIDISCUS Ehrenberg, 1849

CHRYSANTHEMODISCUS Mann, 1925

ETHMODISCUS Castracane, 1886

B STICTOCYCLUS (Grunow) Ross, 1973

EUPODISCUS Bailey, 1851

AULISCUS Ehrenberg, 1843

Auliscus coelatus (0), *A. sculptus* (0).

CERATAULUS Ehrenberg, 1844

Cerataulus sp (0).

ODONTELLA (Lyngbye) Agardh, 1832

Odontella mobiliensis (33).

PLEUROSIRA (Ehrenberg) Compere, 1982

TRICERATIUM Ehrenberg, (1839) 1841

Triceratium alternans (= *Trigonium alternans*) (0,6,29), *T. antediluvianum* (0), *T. favus* (0), *T. formosum* (0), *T. grande* (0), *T. shadboltianum* (+ *T. elongatum*) (0), *T. sp* (29), *T. spinosum* (0).

BT CYMATOSIRA Grunow, 1862

BT CAMPYLOSIRA (A. Schmidt) Grunow, 1885

BT PLAGIOGRAMMOPSIS (Grunow) Hasle *et al.*,

Plagiogrammopsis

PLAGIOGRAMMA Heiberg, 1863

Plagiogramma adriaticum (0), *P. van-heurcki* (0,23).

BP BROCKMANNIELLA (Hustedt) Hasle *et al.*, 1983

BP MINUTOCELLUS Hasle *et al.*, 1983

BT LEYANELLA Hasle *et al.*, 1983

BP ARCOCELLULUS Hasle *et al.*, 1983

PAPILIOCELLULUS Hasle *et al.*, 1983

BP EXTUBOCELLULUS Hasle *et al.*, 1983

CHAETOCEROS Ehrenberg, 1844

Chaetoceros affinis (v. *circinalis*), (0), *C. affinis* (+*C. ralfsi*) (0), *C. affinis* (v. *affinis*) (0,1,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,20,21,23,24,25,26,34), *C. affinis* (+*C. schetti*) (0), *C. affinis* (v. *willei*) (0,6,10,11,12,13,14,25), *C. affinis* (+*C. javanicus*) (0), *C. affinis* (= *C. willei*) (0), *C. anastomosans* (0,13,14,18), *C. atlanticus* (= *C. neapolitanus*) (0), *C. atlanticus* (v. *atlanticus*) (0,7,8,10,17,18,23,25,34), *C. atlanticus* (v. *neapolitanus*) (0,1,17,26), *C. borealis* (8,17), *C. brevis* (0,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,17,18,24,25), *C. calcitrans* (= *C. simplex*) (0,13,18,25), *C. coarctatus* (0,24), *C. compressus* (+*C. contortus*) (0,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,21,25,34), *C. concavicornis* (?) (17,32,34), *C. constrictus* (v. *constrictus*) (0,7,9,17,24,26,34), *C. convolutus* (0,1,7,8,9,12,22,24,25), *C. costatus* (0,6,10,11,12,13,14,15,17,18), *C. crinitus* (0), *C. curvisetus* (0,1,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,28,31,34), *C. dadayi* (0,1,6,9,10,12,13,14,15,17,18), *C. danicus* (0,2,6,7,8,10,12,13,14,17,18,22,26,29,34), *C. debilis* (0,25), *C. decipiens* (+*singularis*) (0,1,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,21,22,23,24,25,26,28,34), *C. delicatulus* (17), *C. densus* (0,1,2,3,5,6,7,8,10,11,12,13,14,15,17,18,25), *C. didema* (= *C. subsecundus*) (0,25,34), *C. dichaeata* (0,34), *C. didymus* (v. *didymus*), (0,1,2,6,7,8,11,14,15,17,18,20,22,23,24,25,26,28,34), *C. didymus* (v. *anglica*) (0), *C. didymus* (v. *protuberans*) (0,9,10,12,13), *C. difficilis* (0,25), *C. dipyrenops* (11,14,18), *C. diversus* (v. *tenuis*) (0), *C. diversus* (v. *diversus*) (0,2,6,10,11,12,13,14,15,16,17,18), *C. eibeni* (0,8,17,23), *C. filiformis* (17), *C. fragilis* (10,18), *C. gracilis* (0,21,25,34), *C. heterovalvatus* (18), *C. holsaticus* (0), *C. insignis* (17,18), *C. lacinosus* (0,6,7,8,9,11,13,17,18,25,34), *C. lauderi* (0,1,6,7,8,10,11,12,13,14,15,17,18,24,25,34), *C. lorenzianus* (0,2,6,7,8,10,11,12,13,14,15,17,18,20,23,24,25,26,28,34), *C. messanensis* (0,1,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,17,18,25,34), *C. muelleri* (25), *C. neogracilis* (= *C. gracilis*) (0), *C. pelagicus* (0,17,26), *C. pendulus* (0,17,25,34), *C. perpusillus* (0,16,17,18,25), *C. peruvianus* (v. *peruvianus*), (0,1,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,21,22,24,26,28,29,34), *C. peruvianus* (v. *gracilis*) (0), *C. pseudocrinitus* (0), *C. pseudocurvisetus* (0,1,2,6,7,8,10,11,12,14,15,17,18,20,23,24,25,28,34), *C. radicans* (= *C. scolopendra*) (0,6,34), *C. rostratus* (0,1,2,3,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,24,28), *C. saltans* (8), *C. schimperanus* (0), *C. seiracanthus* (0,18,25), *C. septentrionalis* (0), *C. socialis* (0,6,7,8,9,12,17,18,24,25,34), *C. sp* (9,10,13,14,18,19,20,21,23,24,25,26,28,29,30), *C. subsecundus* (17), *C. teres* (0,17,18,21,25), *C. tetrastichon* (0,10,11,13,14,18), *C. tortissimus* (0,12,13,14,18), *C. vanheurcki* (0), *C. vistulae* (25), *C. visvisibilis* (16,17,18), *C. whighamii* (0,7,8,9,10,11,12,13,18,21,22,28), *C. willei* (18,20).

BACTERIASTRUM Shadbolt, 1854

Bacteriastrum biconicum (0,6,9,10,11,12,13,18), *B. comosum* (0,11,18), *B. delicatulum* (0,1,2,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,25,26,29,34), *B. elegans* (0,6,7,9,10,11,17,18,25), *B. elongatum* (0,6,7,9,17,25), *B. hyalinum* (0,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,17,18,28,29,34), *B. mediterraneum* (0,2,6,7,12,13,14,17,18), *B. sp* (21,24,28,31), *B. varians* (0,1,34).

LITHODESMIUM Ehrenberg, 1840

Lithodesmium undulatum (0,11,14,15,17,18,24,34).

BELLEROCHEA Van Heurck, 1885

Bellerochea yucatanensis (32).

DITYLUM W. Bailey, 1861

Ditylum brightwellii (0,22,24,25,26,27,28,29,30,34), *D. trigonum* (33).

HELICOTHECA (Shrubsole) Ricard, 1987

Streptotheca tamesis (0,23,24).

NEOSTREPTOTHECA Von Stosch, 1977

Order Pennatae Schütt, 1896

Suborder Fragilariineae

FRAGILARIA Lyngbye, 1819

Fragilaria capucina (0,25), *F. crotonensis* (0,14,18,21,22,25,26), *F. hyalina* (0), *F. pinnata* (0), *F. pirescens* (0), *F. sp* (25,29,34).

BT SYNEDRA Ehrenberg, 1830 partim.

Synedra acus (0), *S. affinis* (0), *S. baculus* (0), *S. crystallina* (0), *S. fulgens* (0), *S. gailloni* (0), *S. hennedyana* (0), *S. investiens* (0), *S. sp* (19,21,29), *S. tabulata* (0,28), *S. ulna* (0,22), *S. undulata* (0,3,5,6,8,18,22,28,29,34).

ARDISSONIA de Notaris, 1871

CYCLOPHORA Castracane, 1878

ASTERIONELLA Hassall, 1855

Asterionella bleakeleyi (0,19,21,29,34), *A. formosa* (4,17,18,21,22,23,25,28,31,34), *A. gracillina* (25), *A. japonica* (= *A. glacialis*) (0,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,28,29,31,34), *A. kariana* (17,22), *A. notata* (0,2,5,6,18).

Diatoma vulgare (0,25,29), *D. sp* (22), *D. elongatum* (0,25,34).

THALASSIONEMA Grunow in Van Heurck, 1881

Thalassionema bacillaris (?) (32), *T. nitzschoides* (= *Thalassiothrix nitz.*) (0,1,2,3,6,7,8,9,10,11,13,14,15,16,17,18,19,20,22,23,24,25,26,28,29,30,34), *T. sp* (25).

THALASSIOTHRIX Cleve & Grunow, 1880

Thalassiothrix frauenfeldi (0,1,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,22,23,25,26,28,29,30,34), *T. longissima* (0,2,10,11,12,13,15,17,18), *T. mediterranea* (= *Asterionella medit.*) (0,6,7,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,23,24,25,26,28,29,30,34), *T. sp* (25).

SYNEDROSPHENIA Hustedt, 1932

BT PODOCYSTIS Kutzing, 1844

Podocystis adriatica (0).

BT OPEPHORA Petit, 1888

Opephora marina (0), *O. pacifica* (0).

BT SCEPTRONEIS Ehrenberg, 1844

GLYPHODESMIS Greville, 1862

Glyphodesmis distans (0), *G. williamsoni* (0).

BT DIMEREGRAMMA Ralfs in Pritchard, 1861

Dimeregramma dubium (0), *D. fulvum* (0), *D. marinum* (0), *D. minus* (0), *D. sp* (22).

BT DIMEREGRAMMOPSIS Ricard, 1987

BT RHAPHONEIS Ehrenberg, 1844

Rhaphoneis amphiceros (0), *R. nitida* (0).

DELPHINEIS Andrews, 1977

BT SUBSILICEA V Stosch & Reim., 1970

TABELLARIA Ehrenberg, 1840

Tabellaria fenestrata (22,34), *T. sp* (26,29,34).

E RHABDONEMA Kutzing, 1844

Rhabdonema adriaticum (0,1,8), *R. arcuatum* (0), *R. sp* (12,14,18).

BP PLAGIOGRAMMA Greville, 1859

HUSTEDTIELLA Simonsen, 1960

B STRIATELLA Agardh, 1832

Striatella delicatula (0), *S. interrupta* (0), *S. unipunctata* (0,8,22,26,28,29,34).

BT GRAMMATOPHORA Ehrenberg, 1839 (1841)

Grammatophora angulosa (0,25,34), *G. gibberula* (0), *G. longissima* (0), *G. marina* (v. *marina*) (0,25,28,34), *G. marina* (v. *adriatica*) (0), *G. oceanica* (v. *adriatica*) (0), *G. oceanica* (= *G. communis*) (0), *G. oceanica* (v. *macilenta subtilissima*) (0), *G. oceanica* (v. *macilenta*) (0), *G. oceanica* (v. *oceanica*) (0,25), *G. serpentina* (0), *G. sp* (22,26,29).

BT LICMOPHORA Agardh, 1827

Licmophora abbreviata (= *L. lyngbyei*) (0,8,25,34), *L. aedipus* (1), *L. communis* (0), *L. dalmatica* (0), *L. ehrenbergi* (v. *ehrenbergi*) (0), *L. ehrenbergi* (v. *subconstricta*) (0), *L. ehrenbergi* (= *L. robusta*) (0), *L. flabellata* (0), *L. gracilis* (v. *gracilis*) (0), *L. gracilis* (v. *anglica*) (0), *L. grandis* (0), *L. hyalina* (0), *L. juergensi* (0), *L. nubecula* (0), *L. paradoxa* (v. *crystallina*) (0), *L. paradoxa* (= *L. crystallina*) (= *L. tinctoria*) (0), *L. paradoxa* (v. *tinctoria*) (0), *L. paradoxa* (v. *paradoxa*) (0), *L. remulus* (28), *L. sp* (18,19, 21,22,23,26,28,29).

BT LICMOSPHENIA Mereschkowsky, 1902

CLIMACOSPHENIA Ehrenberg, 1841

Climacosphenia moniliger (0).

BP ENTOPYLA Ehrenberg, 1848

BT GEPHYRIA Arnott, 1860

E FALCULA Voigt, 1960

PROTORAPHIS Simonsen, 1970

PSEUDOHIMANTIDIUM Hustedt & Kraske, 1941

Suborder Eunotiineae

Mostly Freshwater

Suborder Naviculiineae

BT NAVICULA Bory, 1822

Navicula abrupta (v. *rattrayi*) (0), *N. abrupta* (v. *abrupta*) (0), *N. ammophila* (0), *N. arenaria* (0), *N. arenicola* (0), *N. bacillum* (25), *N. biskanteri* (0), *N. cancellata* (v. *apiculata*) (0), *N. cancellata* (v. *gregori*) (0), *N. cancellata* (v. *cancellata*) (0), *N. clavata* (0), *N. crucicula* (19,21), *N. crucifera* (0), *N. cryptocephala* (0,34), *N. cuspidata* (34), *N. digito-radiata* (v. *cyprinus*) (0), *N. digito-radiata* (v. *digito-radiata*) (0), *N. digitoradiata* (v. *striolata*) (0), *N. directa* (v. *directa*) (0), *N. directa* (v. *subtilis*) (0), *N. distans* (0,24,25, 29,34), *N. elegans* (34), *N. flanicata* (0), *N. forcipala* (v. *punctata*) (0), *N. forcipala* (v. *forcipala*) (0), *N. forcipala* (v. *densistriata*) (0), *N. fortis* (0), *N. fraudulenta* (= *Nitzschia fraudulenta*?) (0,27), *N. gracilis* (v. *schizonemoides*) (0), *N. granulata* (0), *N. grevillei* (v. *grevillei*) (0), *N. grevillei* (v. *commoides*) (0), *N. guttata* (0), *N. hamulifera* (0), *N. hennedyi* (0), *N. humerosa* (0,28), *N. lanceolata* (0), *N. libellus* (0), *N. litoricola* (= *Diploneis litoricola*?) (0), *N. longa* (0), *N. lyra* (= *typica*) (0), *N. lyra* (v. *ellip* = *N. libroides*) (0), *N. lyra* (v. *recta*) (0), *N. lyra* (v. *elliptica*) (0), *N. lyra* (v. *lyra*) (0,28), *N. lyra* (= *producta*) (0), *N. lyroides* (= *N. elliptica*) (0), *N. lyroides* (= *N. lyra intermedia*) (0), *N. mediterranea* (0), *N. minuscula* (0), *N. monilifera* (0), *N. nebulosa* (0), *N. nummularia* (0), *N. opima* (0), *N. palpebralis* (v. *protracta*) (0), *N. palpebralis* (v. *palpebralis*) (0), *N. palpebralis* (v. *semiplena*) (0), *N. pennata* (v. *atlas*) (19), *N. pennata* (v. *maxima*) (0,6,7,8, 11,16,18), *N. pennata* (v. *pennata*) (0,6,7,8,9,10, 11,12,13,16,18,34), *N. peregrina* (0,34), *N. polysticta* (v. *elliptica*) (0), *N. protracta* (0,34), *N. pygmaea* (0), *N. ramosissima* (v. *ramosissima*) (0), *N. ramosissima* (v. *mollis*) (0), *N. reichardti* (0), *N. retusa* (0), *N. robertsi-ana* (0), *N. socialis* (v. *massiliensis*) (0), *N. sp* (10,11,20,22,24,25,28,29,34), *N. spectabilis* (0), *N. subminuscula* (0), *N. versicolor* (0), *N. viridula* (v. *viridula*) (0,25), *N. viridula* (v. *rostellata*) (0), *N. viridula* (v. *slesvicensis*) (0), *N. wawri-kae* (0), *N. zostereti* (0).

LYRELLA (Cleve) Karayeva, 1978

AMPHIPLEURA Kutzing, 1844

Amphipleura pellucida (34), *A. sp* (0,34).

FRUSTULIA Agardh, 1824

ANOMOEONEIS Pfitzer, 1871

STAURONEIS Ehrenberg, 1843

Stauroneis decipiens (28), *S. membranacea* (27), *S. paradoxum* (34), *S. sp* (24).

DICTYONEIS Cleve, 1890

BT DIPLONEIS (Ehrenberg) Cleve, 1894

Diploneis advena (0), *D. bomboides* (v. *bombiformis*) (0), *D. bombus* (0,14,16,18,34), *D. chersonensis* (0,28), *D. coffaeiformis* (0), *D. crabro* (0,34), *D. dalmatica* (0), *D. eximia* (0), *D. fusca* (v. *aestiva*) (0), *D. fusca* (v. *fusca*) (0,6,18), *D. fusca* (v. *delicata*) (0), *D. gemmata* (0), *D. gemmatula* (0), *D. incruvata* (0), *D. interrupta* (29), *D. littoralis* (= *D. litoricola*) (= *Navicula litoricola*) (0), *D. mediterranea* (0), *D. nitescens* (0), *D. papula* (0), *D. placida* (0), *D. praestes* (0), *D. schmidti* (0), *D. sejuncta* (18), *D. smithi* (v. *constricta*) (0), *D. smithi* (v. *cuneata*) (0), *D. smithi* (v. *rhombica*) (0), *D. smithi* (v. *pumila*) (0), *D. smithi* (v. *smithi*) (0), *D. sp* (19,21,22,24, 28,29,30,34), *D. splendida* (28), *D. suborbicularis* (v. *suborbicularis*) (0), *D. suborbicularis* (v. *constricta*) (0), *D. vacillans* (v. *vacillans*) (0), *D. vacillans* (v. *renitens*) (0), *D. weissflogi* (0).

B OESTRUPIA Heiden, 1906

Oestrupia musca (0).

NANONEIS Norris, 1973

BT GOMPHONEMA Ehrenberg, 1831

Gomphonema sp (0,22).

PINNULARIA Ehrenberg, 1841

Pinnularia clavculus (0), *P. rectangulata* (0), *P. sp* (22,34), *P. trevelyana* (0).

CALONEIS Cleve, 1894

Caloneis liber (v. *liber*) (0), *C. liber* (v. *elongata*) (0), *C. liber* (v. *linearis*) (0), *C. maxima* (v. *bicuneata*) (0), *C. westi* (0).

BRACHYSIRA Kutzing, 1836

GOMPHOCALONEIS Meister, 1932

SCOLIOPLEURA Grunow, 1860 partim.

Scoliopleura tumida (0).

SCOLIOTROPIS Cleve, 1894

B CISTULA Cleve, 1894

Cistula lorenziana (0).

BT TRACHYNEIS Cleve, 1894

Trachyneis aspera (v. *pulchella*) (0), *T. aspera* (v. *vulgaris*) (0), *T. aspera* (v. *aspera*) (0), *T. aspera* (v. *intermedia*) (0), *T. oblonga* (0).

BT MASTOGLOIA Wm. Smith, 1856

Mastogloia sp (28).

B CYMATONEIS Cleve, 1894

B CLIMACONEIS Grunow, 1862

E RHOICONEIS Grunow, 1863

BT PLAGIOTROPIS Pfitzer, 1871

Tropidoneis elegans (v. *adriatica*) (0), *T. elegans* (18), *T. lepidoptera* (v. *lepidoptera*) (0), *T. lepidoptera* (v. *mediterranea*) (0), *T. lepidoptera* (v. *minor*) (0), *T. lepidoptera* (v. *delicatula*) (0), *T. lepidoptera* (v. *robusta*) (0), *T. maxima* (0), *T. sp* (21,23,29,34), *T. vitrea* (0).

DONKINIA Ralfs, 1861

B CATENULA Mereschkowsky, 1902

HASLEA (Gaillon) Simonsen, 1974

PACHYNEIS Simonsen, 1974

BT PLEUROSIGMA Wm. Smith, 1852

Pleurosigma angulatum (0,6,7,8,9,18,22,34), *P. australe* (0), *P. cuspidatum* (28), *P. decorum* (0), *P. elongatum* (0,22,34), *P. formosum* (v. *formosum*) (0), *P. formosum* (v. *balearicum*) (0), *P. ibericum* (0), *P. intermedium* (v. *nubecula*) (0), *P. intermedium* (v. *intermedium*) (0), *P. itium* (34), *P. longum* (v. *subrigida*) (0), *P. longum* (v. *lanceolatum*) (25), *P. majus* (0), *P. naviculaceum* (0), *P. nicobaricum* (0,25), *P. normani* (= *P. affine* v. *normani*) (0,18,25,34), *P. obscurum* (v. *macilentia*) (0), *P. rigidum* (0), *P. sp* (5,10,11,12,13,14,15,16,23,24,25, 26,28,29,30,34), *P. speciosum* (0), *P. strigosum* (0), *P. tortuosum* (0).

BP GYROSIGMA (Ehrenberg) Hassall, 1845

Gyrosigma balticum (0), *G. diminutum* (0), *G. hippocampus* (0), *G. lineare* (0), *G. rectum* (v. *thumi*) (0), *G. scalproides* (34), *G. sp* (28,34), *G. spenceri* (0,25), *G. wansbecki* (0,28).

BT BERKELEYA Greville, 1827

RHOICOSPHENIA Grunow, 1860

Rhoicosphenia curvata (v. *curvata*) (0), *R. curvata* (v. *marina*) (0).

ET CAMPYLOPYXIS Medlin, 1985

BT ENTOMONEIS Ehrenberg, 1845

B AMPHORA Ehrenberg, 1840

Amphora acutiuscula (0), *A. angusta* (v. *ventricosa*) (0), *A. angusta* (v. *angusta*) (0), *A. arcus* (v. *arcus*) (0), *A. arcus* (v. *sulcata*) (0), *A. arenaria* (0), *A. bigibbosa* (0), *A. binodis* (0), *A. cingulata* (0), *A. coffaeiformis* (0,28), *A. contracta* (0), *A. costata* (0), *A. crassa* (0), *A. cymbelloides* (0), *A. cymbifera* (0), *A. decussata* (0), *A. egregia* (v. *egregia*) (0), *A. egregia* (v. *exornata*) (0), *A. eunotia* (0), *A. exigua* (0), *A. exsecta* (0), *A. fluminensis* (0), *A. gigantea* (0), *A. grevilleana* (v. *contracta*) (0), *A. hyalina* (0,34), *A. inflexa* (0), *A. janischi* (0), *A. kolbei* (0), *A. laevis* (0), *A. laevisissima* (v. *laevisissima*) (0), *A. laevisissima* (v. *perminuta*) (0), *A. lineolata* (0), *A. macilentia* (0), *A. marina* (0), *A. obtusa* (v. *radula*) (0), *A. ocellata* (v. *ocellata*) (0), *A. ocellata* (v. *bistriata*) (0), *A. ostrearia* (v. *quadrata*) (0), *A. ostrearia* (v. *vitrea*) (0), *A. ostrearia* (v. *lineata*) (0), *A. ostrearia* (v. *ostrearia*) (0), *A. ovalis* (0), *A. peragalloi* (0), *A. proteus* (v. *oculata*) (0), *A. proteus* (v. *maxima*) (0), *A. proteus* (v. *proteus*) (0), *A. pusio* (0), *A. robusta* (0), *A. salina* (0), *A. sp* (22,26,28,29), *A. spectabilis* (0), *A. sulcata* (0), *A. truncata* (0), *A. turgida* (0).

PHAEODACTYLUM Bohlin, 1897

Phaeodactylum sp (28), *P. tricorutum* (0,22,24,26, 33,34).

EPITHEMIA (Ehrenberg) Kutzing, 1844

Epithemia sp (22), *E. turgida* (0).

BT RHOPALODIA (Ehrenberg) Muller, 1895

BT AURICULA Paddock & Sims, 1980

Auricula amphitritis (0), *A. decipiens* (0), *A. insecta* (0), *A. intermedia* (0).

THALASSIOPHYSA Paddock & Sims, 1980

Proboscidea alata (= *Rhizosolenia alata*) (*f. gracillina*) (*Proboscidea* according to Ricard 1987, *Proboscia* according to Round *et al.* 1990) (0,3,6,7,8,10,11,12,15,16,17,18,22,25, 29,33), *P. alata* (*f. alata*) (0,1,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,17,18,20,23,24,25,26,28,29,30, 34), *P. alata* (*f. indica*) (0,6,7,8,11,12,15,16,17,18,22).

BP UNDATELLA Paddock & Sims, 1980

BT SURIRELLA Turpin, 1828

Surirella apiculata (0), *S. comis* (0), *S. fastuosa* (*v. fastuosa*) (0), *S. fastuosa* (*v. suborbicularis*) (0), *S. intercedens* (*v. abludens*) (0), *S. intercedens* (*v. collare*) (0), *S. intercedens* (*v. intercedens*) (0), *S. lata* (0), *S. lorenziana* (0), *S. ovata* (0), *S. sp* (28), *S. sp* (22), *S. subquadrata* (0).

BT CAMPYLODISCUS Ehrenberg, 1840

Campylodiscus adriaticus (*v. massiliensis*) (0), *C. adriaticus* (*v. adriaticus*) (0), *C. biangulatus* (0), *C. brightwelli* (*v. balearicus*) (0), *C. clevei* (0), *C. decorus* (0), *C. fastuosus* (= *C. thureti*) (0), *C. hodgsoni* (+ *C. eximius*) (0), *C. horologium* (0), *C. incertus* (0), *C. limbatus* (0), *C. lorenzianus* (0), *C. sp* (22,29).

BT PLAGIODISCUS Grunow, 1867

BT HYDROSILICON Brun, 1891

NITZSCHIA Wm. Smith, 1853

Nitzschia acicularis (25), *N. acuminata* (0), *N. acuta* (0), *N. angularis* (*v. affinis*) (0), *N. angularis* (*v. kariana*) (0), *N. angularis* (*v. angularis*) (0), *N. apiculata* (0), *N. bilobata* (0,22), *N. brebissoni* (0), *N. clarissima* (0), *N. clausi* (25), *N. constricta* (*v. subconstricta*) (0), *N. debilis* (0), *N. distans* (*v. distans*) (0,28,34), *N. distans* (*v. tumescens*) (0), *N. fluminensis* (0), *N. fraudulenta* (28), *N. frustulum* (0), *N. habirshawii* (= *N. sigma habirshawii*) (0), *N. hungarica* (34), *N. hybrida* (0), *N. insignis* (*v. insignis*) (0), *N. insignis* (*v. notabilis*) (0), *N. insignis* (*v. adriatica*) (0), *N. insignis* (*v. spathulifera*) (0), *N. insignis* (*v. mediterranea*) (0), *N. lanceolata* (0), *N. lineola* (= *N. pseudodelicatissima*) (0), *N. lineola* (= *N. delicatissima*) (0,1,6,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,26,28,29,34), *N. littoralis* (0), *N. longissima* (*v. longissima*) (0,5,6,7,8,10,11,13,14,16,18,22,23,24,25,28,29,34), *N. longissima* (*v. reversa*) (0), *N. lorenziana* (*v. lorenziana*) (0), *N. lorenziana* (*v. subtilis*) (0), *N. macilentata* (0), *N. marina* (0), *N. martiana* (0), *N. maxima* (0), *N. media* (0), *N. migrans* (28), *N. minutissima* (0), *N. obtusa* (25,34), *N. ocellata* (0), *N. pacifica* (? Cupp) (25), *N. pacifica* (25), *N. palea* (0,25,28,34), *N. panduriformis* (*v. lata*) (0), *N. panduriformis* (*v. minor*) (0), *N. panduriformis* (*v. panduriformis*) (0,28), *N. paradoxa* (= *Bacillaria paxillifer*) (0,2,3,5,6,7,8,9,10,11,12,14,18, 25,28,34), *N. plana* (0), *N. pulchella* (0), *N. punctata* (*v. coarctata*) (0), *N. punctata* (*v. punctata*) (0), *N. recta* (0), *N. rigida* (0), *N. romana* (28), *N. scalaris* (28), *N. sicula* (18,20,34), *N. sigma* (*v. sigma*) (0,6,18,22), *N. sigma* (*v. intercedens*) (0), *N. sigma* (*v. sigmatella*) (0), *N. sigma* (*v. rigida*) (0), *N. sigmoidea* (*v. armoricana*) (0),

N. sigmoidea (*v. sigmoidea*) (0), *N. sinuata* (22), *N. smithi* (0), *N. socialis* (*v. massiliensis*) (0), *N. socialis* (*v. socialis*) (0), *N. socialis* (*v. kariana*) (0), *N. sp* (20, 22,23,24,25,28,30,34), *N. spathulata* (*v. hyalina*) (0), *N. spathulata* (*v. spathulata*) (0), *N. spectabilis* (0), *N. subpacifica* (20), *N. valida* (0), *N. vermicularis* (28).

PSEUDONITZSCHIA Peragallo, 1897-1908

Pseudonitzschia nigrans (= *Nitzschia*) (19), *P. heimii* (24), *P. seriata* (18,24), *P. delicatissima* (18,24), *P. pungens* (0,1,2,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21, 22,25,26,28,29,34), *P. pungens* (*v. atlantica*) (25).

DENTICULOPSIS Simonsen, 1979

Denticula tenuis (0).

BACILLARIA (O.F. Muller) Hendey, 1964

Bacillaria paxillifer (= *B. paradoxa*) (0,2,3,5,6,7,8,9,10, 11,12,14,18,25,28,34).

HANTZSCHIA (Ehrenberg) Grunow, 1877

Hantzschia sp (22).

CYLINDROTHECA Van Heurck, 1880-85

Cylindrotheca closterium (= *Nitzs. closterium*) (0,2,6,9, 10,12,14,15,16,17,18,20,21,22,23,24,25,26,28,29,34), *C. fusiformis* (0).

BP CYMATONITZSCHIA (Lewis) Simonsen, 1974

Cymatonitzschia marina (= *Nitzschia marina*) (34), *C. marina* (= *Denticula seminae*) (= *D. marina*) (29).

PSEUDÆUNOTIA (Wallich) Grunow, 1880

Pseudæunotia doliolus (32).

Suborder Achnanthiineae

BT ACHNANTHES Bory, 1822 :

Achnanthes affinis (0), *A. brevipes* (*v. parvula*) (0), *A. brevipes* (*v. brevipes*) (0), *A. danica* (0), *A. delicatula* (0), *A. lanceolata* (0), *A. longipes* (0,26), *A. minutissima* (0), *A. parvula* (0), *A. sp* (22,28,29), *A. suchlandti* (0).

BP COCCONEIS Ehrenberg, 1838 :

Cocconeis britannica (0), *C. commutatus* (25), *C. costata* (0), *C. diminuta* (0), *C. dirupta* (*v. dirupta*) (0), *C. dirupta* (*v. flexella*) (0), *C. molesta* (*v. crucifera*) (0), *C. molesta* (*v. molesta*) (0), *C. pellucida* (*v. minor*) (0), *C. pellucida* (*v. pellucida*) (0), *C. pinnata* (0), *C. placentula* (28,29), *C. pseudomarginata* (0), *C. quarnerensis* (0), *C. scutellum* (*v. scutellum*) (0,28), *C. scutellum* (*v. ornata*) (0), *C. scutellum* (*v. stauroneiformis*) (0), *C. sp* (22,25), *C. thumensis* (0).

BT ANORTHONEIS (Donkin) Grunow, 1867

CAMPYLONEIS Grunow, 1862

Campyloneis grevillei (*v. regalis*) (0).

Classified according to Round (1990)

ARAPHID PENNALES

T ASTERIONELLOPSIS Round 1990

Asterionellopsis glacialis (33).

T STAUROSIRA (Ehrenberg) Williams & Round 1987

Staurosira capucina (19), *S. mutabilis* (19).

RAPHID PENNALES

B ENTOMONEIS Ehrenberg 1845

Entomoneis alata (= *Amphiprora alata*) (28,29,34)

E CYMBELLA Agardh 1830

Cymbella affinis (0), *C. amphicephala* (0), *C. cymbiformis* (0), *C. helvetica* (0), *C. parva* (0), *C. sp* (22, 28,29,34), *C. tumida* (0), *C. ventricosa* (0).

BP PLEUROSIGMA Smith 1852

Rhoicosigma mediterraneum (0), *R. oceanicum* (f. minus) (0).

Toxonidea balearica (0), *T. insignis* (28).

Classified according to Cupp 1943 (neither cited by Ricard (1987) nor by Round *et al.*, 1990)

AMPHIPRORA (Ehrenberg 1843) Cleve 1894

Amphiprora alata (= *Entomoneis alata*) (28,29,34), *Amphiprora gigantea* (v. *gigantea*) (0,29), *A. gigantea* (v. *decussata*) (0), *A. gigantea* (v. *sulcata*) (= *A. sulcata*) (0), *A. pulchra* (v. *pulchella*) (0), *A. sp* (12,18,24,26, 29,34).

REFERENCES

- ARFI R., G. CHAMPALBERT, G. PATRITI, A. PUDDU, J. REYS, 1982. Etude préliminaire comparée du plancton du vieux-port, de l'avant-port et du Golfe de Marseille. *Tethys* **10** (3) : 211-217.
- BALLE P., 1953. Fitoplancton de la Bahia de Palma de Mallorca. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* **61** : 1-23.
- BALLE P., 1954. Analisis cualitativo del fitoplancton de la Bahia de Palma de Mallorca en 1953. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* **61**(68) : 3-13.
- BALLE P., 1959. Analisis cualitativo del fitoplancton del puerto de Palma de Mallorca (desde Abril de 1956 a Diciembre de 1957). *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* **93** : 1-13.
- BLANC F., M. LEVEAU, K.-H. SZEKIELDA, 1969. Effects eutrophiques au débouché d'un grand fleuve (Grand Rhône). *Mar. Biol.* **3** : 233-242.
- BLANC F., M. LEVEAU, M.-C. BONIN, 1975. Ecosystème planctonique. Structure et fonctionnement en relation avec des phénomènes de dystrophie (Golfe de Fos). *Int. Rev. ges. Hydrobiol.* **60** (3) : 359-378.
- BLASCO, D. 1970a. Ultraestructura de *Hemidiscus hardmanianus* Grev. y consideraciones sobre la filogenia de este género. *Inv. Pes.* **34** (2) : 229-235.
- BLASCO D., 1970b. Estudio de la morfología de *Chaetoceros didymus* al microscopio electronico. *Inv. Pes.* **34**(2) : 149-155.
- BOURGADE B., 1977. Impact des rejets thermiques sur les populations phytoplanctoniques aux abords de la centrale thermique EDF Martigues-Ponteau. *Tethys* **8** (1) : 47-62.
- CACHON J., M. CACHON-ENJUMET, 1964. *Leptospathium navicula* nov. gen. nov. sp. et *Leptophyllus dasypus* nov. gen. nov. sp., Péridiniens Noctilucidae (Hertwing) du plancton néritique de Villefranche-sur-Mer. *Bull. Inst. Océanogr. Monaco* **62** (1292) : 1-11.
- CASTELLVI J., 1963. Pigmentos de la diatomea marina *Skeletonema costatum* (Grev.) en su dependencia de los factores ambientales y de la dinamica de las poblaciones. *Invest. Pesq* **24** : 129-137.
- CRUZADO A., Z.R. VELASQUEZ, 1990. Nutrients and phytoplankton in the Gulf of Lions, northwestern Mediterranean. *Continental Shelf Res.* **10** (9/11) : 931-942.
- CUPP E.E., 1943. Marine Plankton Diatoms of the West Coast of North America. U. of Calif. Press, Berkeley. 236 p.
- DANGEARD P., 1932. Phytoplancton recueilli à Banyuls-sur-mer. *Arch. Zool. Exp. Gén.* **74** (Jubil), 317-355.
- DELGADO M., 1986. Ecología de las diatomeas costeras. Relacion plancton-benthos. Ph. D. Thesis. Univ. Barcelona, 261 p.
- DELGADO M., 1987. Fitoplancton de las bahias del delta del Ebro. *Inv. Pesq.* **51**(4) : 517-548.
- DELGADO M., J.M. FORTUO, 1990. Atlas de fitoplancton del Mar Mediterraneo. *Scientia Marina* **55** (Supp. 1) : 1-133.
- DESCY J.P., C. WILLEMS, 1991. Contribution à la connaissance du phytoplancton de la Moselle (France). *Crypt. Algal.* **12** (2) : 87-100.
- DEVEZE L., 1959. Cycle biologique des eaux et ecologie des populations planctoniques. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume* **15** (25) : 220.
- ESTRADA M., 1979. Observaciones sobre la heterogeneidad del fitoplancton en una zona costera del mar Catalan. *Inv. Pesq.* **43** (3) : 637-666.
- ESTRADA M., 1980. Composicion taxonomica del fitoplancton en una zona proxima a la desembocadura del rio Besos (Barcelona), de Octubre de 1978 a Marzo de 1979. *Inv. Pesq.* **44** (2) : 275-289.
- ESTRADA M., 1991. Phytoplankton assemblages across a NW Mediterranean front : Changes from winter mixing to spring stratification. *Oecologia Aquatica* **10** : 157-185.
- GOURRET M.-P., 1883. Sur les Péridiniens du Golfe de Marseille. *Ann. Mus. Hist. Nat. Marseille* **8**(1) : 1-37.

- HERRERA J., R. MARGALEF, 1957. Hidrografia y fitoplancton de las costas de Castellon, de julio de 1956 a junio de 1957. *Inv. Pesq.* **10** : 17-44.
- HERRERA J., R. MARGALEF, 1961. Hidrografia y fitoplancton de las costas de Castellon de julio de 1958 a junio de 1959. *Inv. Pesq.* **20** : 17-63.
- JACQUES G., 1967. Aspects quantitatifs du phytoplancton de Banyuls-sur-Mer (Golfe du Lion). I. Pigments et population phytoplanctoniques dans le Golfe du Lion en mars 1966. *Vie Milieu* **18** (2b) : 239-263.
- JACQUES G., 1969. Aspects quantitatifs du phytoplancton de Banyuls-sur-Mer (Golfe du Lion). III. Diatomees et Dinoflagelles de juin 1965 a junio 1968. *Vie Milieu* **20** (1-B), 91-126.
- KIM K.T., 1980. Contribution à l'étude de l'écosystème pélagique dans les parages de Carry-le-Rouet (Méditerranée nord-occidentale). *Tethys* **9** (4) : 317-344.
- LEGER G., 1971. Les populations phytoplanctoniques au point 42 47'N, 7 29'E (Bouee laboratoire du COMEXO/CNEXO). A. Généralités et premier séjour (21-27 fevrier 1964). *Bull. Inst. Oceanogr. Monaco* **69** : 5-41.
- LOPEZ J.-J., P. ARTE, 1972. Aguas rojas en el Mediterraneo occidental. *Publ. tec. dir. gral. pesca.* **10** : 399-412.
- MARGALEF R., 1945a. Fitoplancton neritico estival de Cadaques (Mediterraneo catalan). *Public. Inst. Biol. Apl.* **2** : 89-95.
- MARGALEF R., 1945b. El fitoplancton estival de la Costa Brava catalana (Sector Blanes). *Publ. Biol. Inst. Esp. Est. Mediterr.* **1** : 48 p. 10 pl.
- MARGALEF R., 1951. Ciclo anual de fitoplancton marino de la costa NE de la Peninsula Ibérica. *Publ. Inst. Biol. Apl.* **9** : 83-119.
- MARGALEF R., 1957. Fitoplancton de las costas de Blanes (Gerona) de agosto de 1952 a junio de 1956. *Invest. Pesq.* Tomo **VIII**, 89-95.
- MARGALEF R., 1964. Fitoplancton de las costas de Blanes (provincia de Gerona, Mediterraneo Occidental), de julio de 1959 a junio de 1963. *Inv. Pesq.* **26** : 131-164.
- MARGALEF R., 1965. Distribucion ecologica de las especies del fitoplancton marino en un area del Mediterraneo occidental. *Inv. Pesq.* **28** : 117-131.
- MARGALEF R., 1969. Composicion especifica del fitoplancton de la costa catalano-levantina (Med. occ.) en 1962-1967. *Inv. Pesq.* **33**(1) : 345-380.
- MARGALEF R., 1971. Distribucion del fitoplancton entre Corcega y Barcelona, en relacion con la mezcla vertical del agua, en marzo de 1970. *Inv. Pesq.* **35**(2) : 687-697.
- MARGALEF R., A. BALLESTER, 1967. Fitoplancton y produccion primaria de la costa catalana, de junio de 1965 a junio de 1966. *Inv. Pes.* **31**(1) : 165-182.
- MARGALEF R., J. CASTELLVI, 1967. Fitoplancton y produccion primaria de la costa catalana, de julio de 1966 a julio de 1967. *Inv. Pesq.* **31**(3) : 491-502.
- MARGALEF R., M. ESTRADA, 1981. On upwelling, eutrophic lakes, the primitive biosphere, and biological membranes. *Coastal Upwelling* **1** : 522-529.
- MARGALEF R., M. ESTRADA, 1987. Synoptic distribution of summer microplankton (Algae and Protozoa) across the principal front in the Western Mediterranean. *Inv. Pesq.* **51**(1) : 121-140.
- MARGALEF R., J. HERRERA, 1963a. Hidrografia y fitoplancton de las costas de Castellon, de julio de 1959 a junio de 1960. *Inv. Pesq.* **22** : 49-109.
- MARGALEF R., J. HERRERA, 1963b. Hidrografia fitoplancton de la costa comprendida entre Castellon y la desembocadura del Ebro, de julio de 1960 a junio de 1961. *Inv. Pesq.* **24** : 33-112.
- MARGALEF R., J. HERRERA, 1964. Hidrografia y fitoplancton de la costa comprendida entre Castellon y la desembocadura del Ebro, de julio de 1961 a julio de 1962. *Inv. Pesq.* **26** : 49-90.
- MARGALEF R., J. HERRERA, 1966. La produccion primaria en las aguas del puerto de Barcelona. *Inv. Pesq.* **30** : 45-48.
- MARGALEF R., E. MORALES, 1960. Fitoplancton de las costas de Blanes (Gerona) de julio de 1956 a junio de 1959. *Inv. Pesq.* **16** : 3-31.
- MASSUTI M., 1930. El plancton de la Bahía de Palma de Mallorca en 1929. *Not. Resum. I.E.O.* **43**(II) : 1-28.
- MASSUTI M., 1944. Nuevos datos para el conocimiento del plancton del Mar de Baleares. *Ann. Univ. Barcelona, Cronicas, Discursos, Mem. Comunic.* 1943 : 177-184.
- MASSUTI M., 1948. Estudio del plancton del puerto de Mahon en el curso de un año (1946). *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* **2** : 1-29.
- MASSUTI M., R. MARGALEF, 1950. Introduccion al estudio del plancton marino. *Patr. J. Cierva*, 182 p.
- MINAS H.-J., A. TRAVERS, M. TRAVERS, S. MAESTRINI, 1968. Première utilisation à Villefranche-sur-Mer de la bouée-laboratoire du COMEXO pour l'étude de la distribution du microplancton et de certains facteurs écologiques. *Rec. Trav. Stn mar. Endoume* **44** (60) : 13-42.
- MORALES E., 1952. Plancton recogido por los laboratorios costeros. IV Fitoplancton de Blanes durante los meses de julio de 1950 a julio de 1951. *Publ. Inst. Biol. Aplic.* **10** : 67-79.
- MORALES E., 1956. Fitoplancton de Blanes desde agosto de 1951 hasta julio de 1952. *Inv. Pesq.* **4** : 47-48.
- MORALES E., E. ARIAS, 1965. Ecologia del puerto de Barcelona y desarrollo de adherencias organicas sobre placas sumergidas. *Inv. Pesq.* **28** : 49-79.
- NAVARRO F. DE P., L. BELLON-URIARTE, 1945. Catalogo de la Flora del Mar de Baleares (con exclusion de las Diatomeas). *Not. Res. I.E.O.* **124**(II) : 161-295.
- NAVARRO F., M. MASSUTI, 1929. Oceanografia, plancton y pesca en la Bahía de Palma de Mallorca en 1928. Instituto Espanol de Oceanografia, *Not. Res.* **2**(33) : 1-61.
- NAVARRO F., M. MASSUTI, 1940. Composicion y ciclo anual del plancton superficial de la bahía de Palma de Mallorca. Instituto Espanol de Oceanografia, *Not. Res.* **2**(97) : 1-62.

- PALAU M., C. CORNET, T. RIERA, M. ZABALA, 1991. Planktonic gradients along a Mediterranean sea cave. *Oecologia Aquatica* **10** : 299-316.
- PAVILLARD J., 1909. Sur les Peridinees du Golfe du Lion. *Bul. Soc. Bot.* **9** : 277-284.
- PAVILLARD J., 1916a. Recherches sur les Peridinees du Golfe du Lion. *Trav. Stn. Zool. Sète* **4** : 9-70.
- PAVILLARD J., 1916b. Recherches sur les Diatomées pélagiques du Golfe du Lion. *Trav. Stn. Zool. Sète* **5** : 1-63.
- PAVILLARD J., 1916c. Flagelles nouveaux épiphytes des diatomées pélagiques. *C.R. Acad. Sci. Paris* **163** : 1-65.
- PERAGALLO H., M. PERAGALLO, 1908. Diatomées marines de France et des districts maritimes voisins. Grez-sur-Loing. Tempère M.J., 1-491.
- RAMPI L., M. BERNHARD, 1978. Key for the determination of mediterranean pelagic diatoms. CNEN, Rome, 71 p.
- RICARD M., 1987. Atlas du phytoplancton marin. (A. Sournia, Ed). Vol. 2. Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 1-297.
- ROUND F.E., R.M. CRAWFORD, D.G. MANN, 1990. The Diatoms. Biology and Morphology of the Genera. Cambridge University Press. Cambridge. 747 p.
- TRAVERS A., 1962. Recherches sur le phytoplancton du Golfe de Marseille. 1. Etude qualitative des Diatomées et des Dinoflagelles du golfe de Marseille. *Rec. Trav. Stn Mar Endoume* **41** : 7-69.
- TRAVERS M., 1962. Recherches sur le phytoplancton du Golfe de Marseille. 2. Etude quantitative des populations phytoplanctoniques du Golfe de Marseille. *Rec. Trav. Stn mar. Endoume* **26** (41) : 70-139.
- TRAVERS M., 1975. Inventaire des protistes du Golfe de Marseille et de ses parages. *Ann. Inst. Oceanogr.*, Paris (N.S.) **51** (1) : 51-75.
- TREGOUBOFF G., M. ROSE, 1957. Manuel de Planktonologie Méditerranéenne, I, II. Centre National Recherche Scientifique, Paris, 1-587.
- VELÁSQUEZ Z.-R., 1995. Phytoplankton and Chlorophylls in the NW Mediterranean Sea. *Deep Sea Research* (submitted).
- VELÁSQUEZ Z.-R., A. CRUZADO, 1990. Distributions of phytoplankton during cruise DISCOVERY in the NW Mediterranean. *CEC Water Pol. Res. Reports*, **20** : 93-130.
- VELÁSQUEZ Z.-R., A. CRUZADO, N. MARBA, J. MERINO, J. PLUSS, 1991. An expert system for phytoplankton taxonomy. *Plankton Newsletter*. **15** : 43-47.

Reçu le 6 octobre 1994; received October 6, 1994
Accepté le 16 décembre 1994; accepted December 16, 1994

DIATOMS FROM LA TRINITAT SALT WORKS, EBRE DELTA (SPAIN). CONSIDERATIONS ABOUT *AMPHORA HYALINA*

Q. MERINO¹, E. CLAVERO², J. GRIMALT²
& M. HERNÁNDEZ-MARINÉ¹

¹Unitat de Botànica, Facultat de Farmàcia, Universitat de Barcelona, Av. Joan XXIII, s/n
08028 Barcelona, Spain

²Departament de Química Ambiental, CID-CSIC, C/ Jordi Girona 18-26, 08034 Barcelona, Spain

AMPHORA HYALINA
DIATOMS
HYPERHALINE ENVIRONMENTS
SALT FIELDS

ABSTRACT – *Amphora hyalina* Kütz. has been recorded from some hypersaline lagoons of «La Trinitat» salt fields (Catalonia, Spain). However, ultrastructural features show that two different morphotypes coexist, both of them identifiable as *A. hyalina* at the optical level. Both are described with LM and SEM, comparing their morphological and ultrastructural characteristics with those reported in the literature. The taxonomic position and autoecology of *A. hyalina* are discussed.

AMPHORA HYALINA
DIATOMEES
ENVIRONNEMENTS HYPER SALINS

RÉSUMÉ – *Amphora hyalina* Kütz. a été citée de quelques lacunes hypersalines des marais salants de «La Trinitat» (Catalogne, Espagne). Néanmoins, ses traits ultrastructuraux montrent, en fait, que deux taxons différents coexistent quoique tous les deux soient identifiables comme *A. hyalina* au niveau optique. Nous nous proposons, notamment, de décrire ces deux taxons au MO et au MEB, de comparer leurs caractères morphologiques et ultrastructuraux avec ceux reportés dans la littérature et de discuter la position taxonomique et l'autoécologie d'*A. hyalina*.

INTRODUCTION

The dominant algae living on the sediment of the majority of hypersaline lagoons are Cyanobacteria, but eukaryotic algae are often present and sometimes even abundant (Ehrlich & Dor, 1985). Among the eukaryotic microalgae, diatoms are possibly the best represented group, at least in salinities lower than 100‰ (Remane, 1971). However, little has been published until now on diatom assemblages of permanently hypersaline coastal lagoons such as the pools that constitute evaporation basins (Ehrlich, 1975). Identification of taxa living in such environments is therefore a serious problem in ecological studies based on diatom communities.

Amphora Ehr. ex Kütz. is one of the best represented genera in high salinity ponds. The genus contains over 350 acceptable species listed according to VanLandingham (1967). Most of them were described from marine and brackish habitats, and only a few from freshwater. The latter are rather well studied, and much information is available on them (Mann, 1994). However, this is not

the case for most of the saline forms. In the literature, many taxa have been described with only a short diagnosis, some drawings and sporadically a few light micrographs. The lack of data and the morphological variation displayed by some species in relation to salinity differences (Lee & Round, 1987) lead to some confusion in their identification. Fortunately, some *Amphora* species living in saline environments have been thoroughly described: John (1981), Archibald & Schoeman (1984, 1985), Schoeman & Archibald (1984), Karayeva (1987) and Mann (1994).

Amphora hyalina was described by Kützing in 1844 and placed in the subgenus *Oxyamphora* by Cleve (1895). It has mainly been recorded from marine habitats (Cleve, 1895; Cleve-Euler, 1953; Navarro, 1982; Bérard-Therriault *et al.*, 1986; Karayeva; 1987), but also from oligo-mesohaline waters in estuarine conditions (Hendey, 1964; Giffen, 1967; Aleem, 1973; Kaczmarek & Rushforth, 1983) and from hypersaline environments (Rincé & Robert 1983). According to these records, *Amphora hyalina* can tolerate a very wide spectrum of environmental conditions.

During a study of the diatom communities of several hypersaline lagoons from «La Trinitat» salt fields in Spain, some specimens that could be identified with LM as *A. hyalina* were frequently found living on the sediment. However, when these were observed by SEM, it became obvious that there were, in fact, two morphotypes with major ultrastructural differences. The objective of this work is to describe both taxa using LM and SEM, and to compare their morphological and ultrastructural characters with those reported in the literature for *Amphora hyalina*.

MATERIAL AND METHODS

«La Trinitat» salt fields are located near the mouth of the Ebre River, on the Ebre delta ($40^{\circ}35'N$ $0^{\circ}40'E$, Catalonia, Spain). They consist of several ponds with salinities higher than that of the sea, which form an array and are connected by sluices. In each pond, salinity is kept more or less stable. Sea water is pumped from «Els Alfacs» Bay (Fig. 1), flows through the system of ponds and, because of evaporation, increases in salinity. Both of the taxa studied were collected from the sediment in the first two pools of the array (stations 1 and 2), which are large, shallow lagoons where coarse particles settle and calcium carbonate precipitates. Salinity was relatively low (station 1: 40-50‰; station 2: 50-80‰), though higher than that of the sea. Samples were taken by hand from the uppermost 1 cm of the sediment. They were placed in Petri dishes and some coverglasses arranged on the surface. Diatoms were removed from the coverglasses two or three days

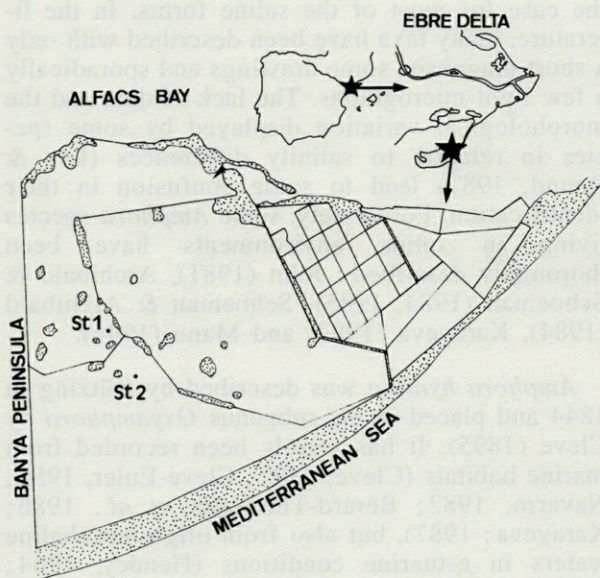


Fig. 1. — Sampling stations in «La Trinitat» salt fields. The striped areas represent sandy zones that are not inundated. Areas in white represent the pools in the salt fields. St 1 and St 2 are the sampling points.

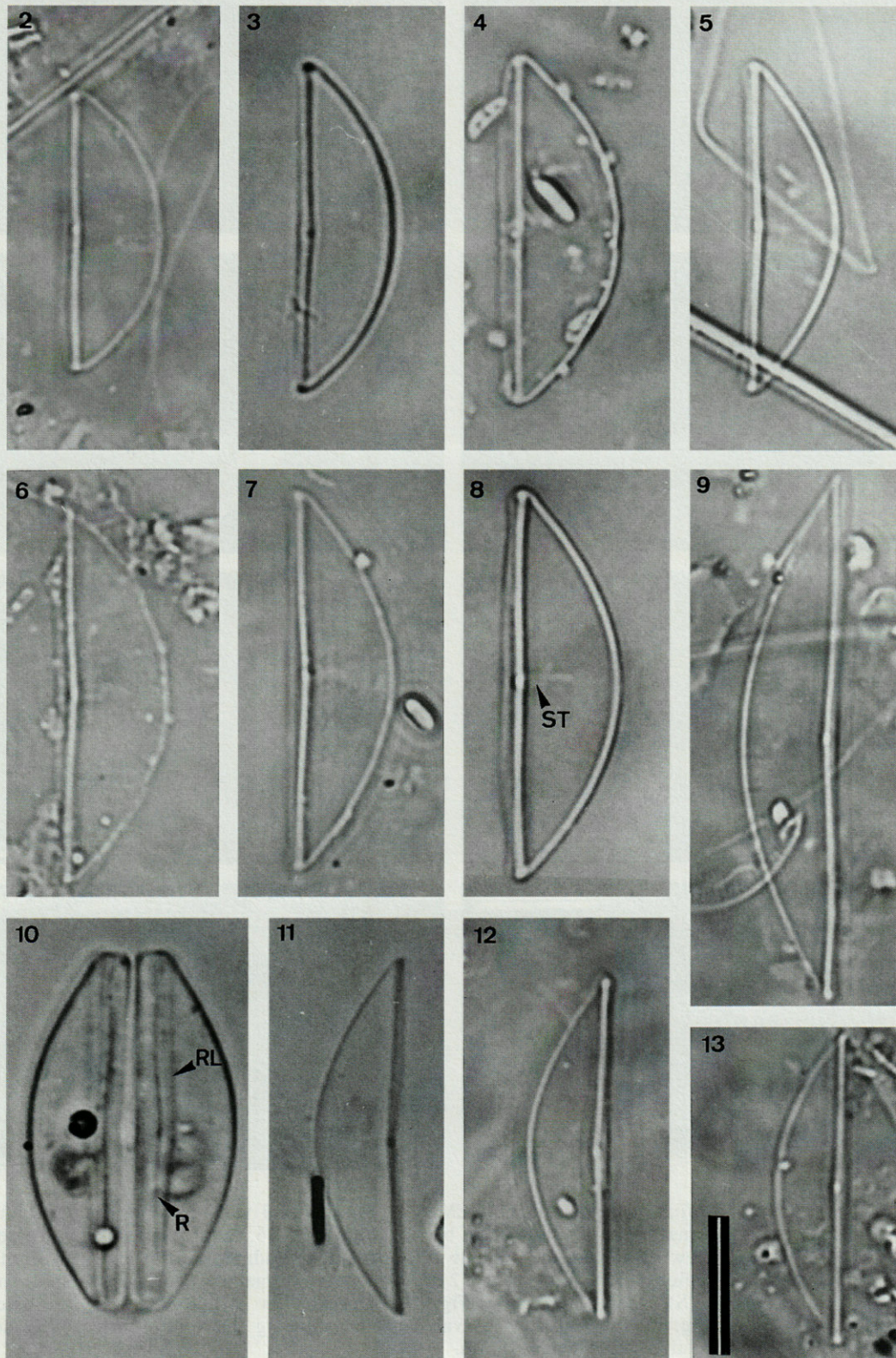
later, and were preserved with some drops of formaldehyde. The material was then rinsed with distilled water, cleaned with 5% HCl, boiled in 30% H₂O₂ until clear of organic matter, and finally rinsed again with distilled water. For LM, the cleaned material was air-dried onto coverglasses and mounted on microscope slides with Naphrax. Diatoms were observed in a Nikon Optiphot-2 light microscope provided with phase and Nomarsky interference optics and photographed with a Nikon FX-35DX camera. For SEM, the material was air-dried on membrane filters, which were then placed onto aluminum stubs and coated with gold. Micrographs were taken using a Hitachi S-2300 equipment, operated at an accelerating voltage of 15 kV.

For the purposes of this paper the slide containing the type material of *Amphora hyalina* have been examined. It is located in the Kützing collection of the Natural History Museum, London (BM 18946).

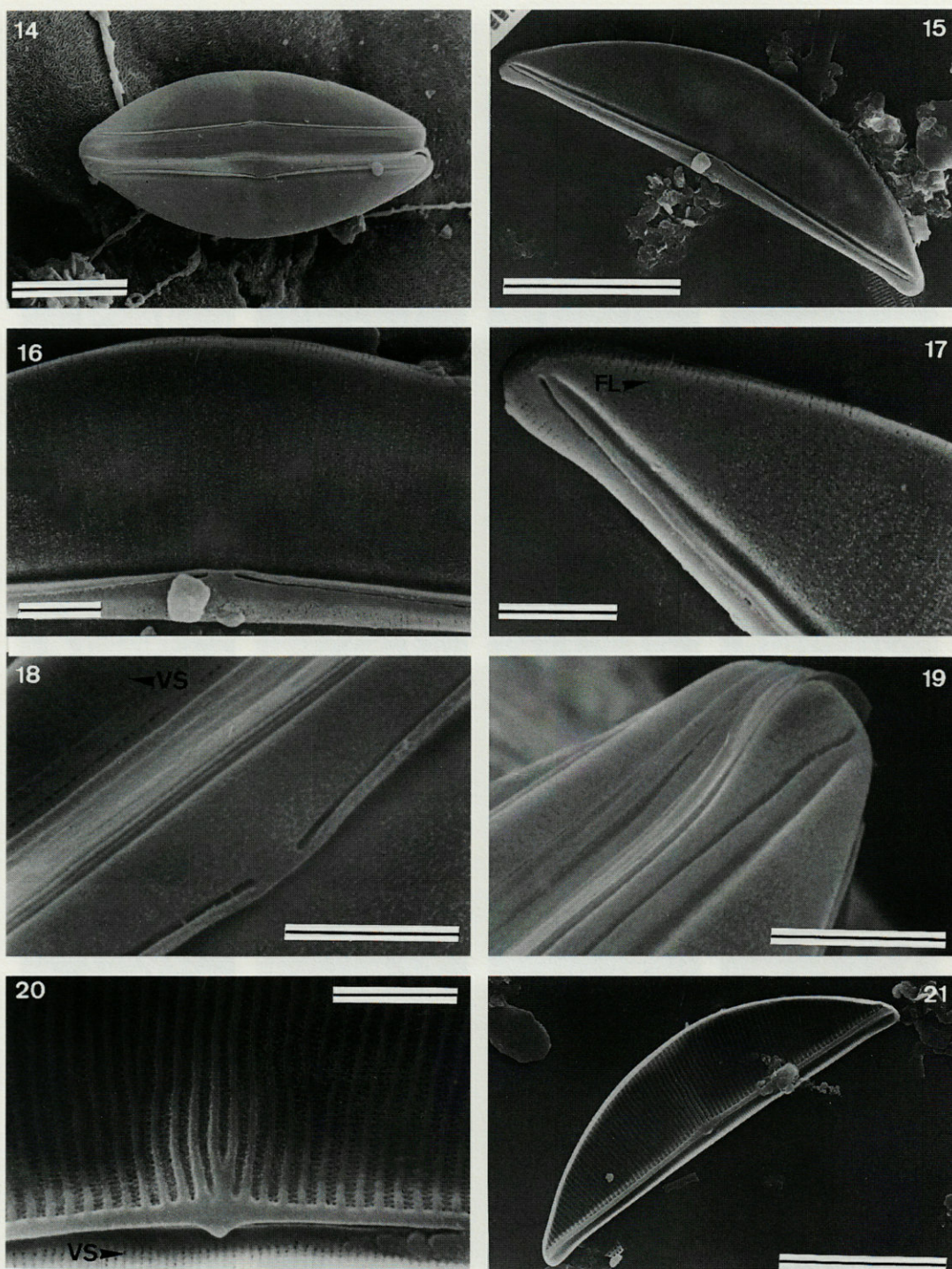
DESCRIPTIONS OF THE TAXA

Amphora aff. *hyalina* Kütz : Morphotype 1

This morphotype has weakly siliceous and broadly elliptical frustules (Fig. 14) ranging from (21-) 26 to 37 μm long. The valves are semielliptical to broadly semilanceolate, 5.8-10 μm wide, with a convex dorsal margin and a nearly straight ventral margins (Figs. 2-8, 15, 21-22). The valve ends are subacute and slightly deflected to the ventral side. The axial area is very narrow, and the central area is scarcely developed on the ventral side. Both dorsal and ventral striae are very delicate, hardly visible in LM (Figs. 2-8). On the dorsal side the striae are parallel and slightly convergent near the ends, 32-36 in 10 μm , and are formed of two rows of alternately arranged pores (Figs. 16-17, 20, 23-25). They are more densely arranged in the dorsal distal side of the valves (70-75 in 10 μm), and here are composed of single rows of puncta (Fig. 17). This different arrangement of the striae is the consequence of the bifurcation of the costae at the junction between the dorsal and the distal dorsal sides (Fig. 23). However, there is not any hyaline line at this junction as occurs in morphotype 2 (see below). The ventral striae are very short, 65-70 in 10 μm , and also consist of single rows of puncta (Figs. 16-20). The raphe is filiform, running close to the ventral margin, with more or less straight raphe branches sloping gently upwards from the poles to the central nodule (Figs. 2-8, 15). Externally, the raphe sternum bears a thin raphe ledge (conopeum) on the dorsal side, which covers only a small portion of the striae (Figs. 14-19). Beneath it lies a narrow canal (Figs. 17, 19). Both proximal and distal raphe ends are slightly deflected to the dorsal side (Figs. 16-17). Internally, the raphe runs along the ventral edge of a slightly raised axial rib



Figs. 2-13. - *Amphora aff. hyalina*, LM. Scale bar = 10 μ m. ST : Stauros-like (shadow line), R : Raphe, RL : Raphe ledge. Figs. 2-8. Valves of morphotype 1. Figs. 9, 11-13. Valves of morphotype 2. Fig. 10. Frustule of morphotype 2.



Figs. 14-21. - *Amphora aff. hyalina* (morphotype 1), SEM. Fig. 14. External view of ventral side of the frustule, scale bar = 10 μ m. Fig. 15. External view of valve, scale bar = 10 μ m. Fig. 16. External view of valve center, scale bar = 2 μ m. Fig. 17. External view of valve end, showing the polar raphe ending and the interruption of the striae between dorsal and residuum regions (FL), scale bar = 2 μ m. Fig. 18. External view of ventral side, showing the structure of the ventral striae (VS), scale bar = 2 μ m. Fig. 19. External view of apex, showing the external polar raphe end, scale bar = 2 μ m. Fig. 20. Internal view of valve center, showing the ventral striae (VS), scale bar = 2 μ m. Fig. 21. Internal view of valve, scale bar = 10 μ m.

(Figs. 20-25). The central nodule raises in the middle as a narrow tongue-like expansion deflected to the ventral side (Fig. 20).

Most of the specimens have a transapical shadow line (like a stauros) on the dorsal side, which begins at the central nodule and ends ap-

proximately halfway across the valve face (Fig. 8, arrow). This feature is specially obvious using phase contrast optics. SEM internal views show that the shadow line is produced by thickening of some transapical costae arising from the central nodule (Figs. 20-24). This conspicuous character has never been previously described for *A. hyalina*, and it is mainly for this reason that we hesitate about the identity of morphotype 1.

Specimens were found at the stations 1 and 2, at salinities from 40 to 80‰. They were always frequent on the sediment and sometimes (in spring) even abundant.

Amphora aff. *hyalina* Kütz. : Morphotype 2

Here, the frustules are lanceolate with truncate ends (Fig. 10). The valves are weakly silicified and semilanceolate, 24.8-37.0 µm long and 4.6-6.9 µm wide, with convex dorsal margins and straight ventral margins (Figs. 9, 11-13). The valve ends are fairly acute and not ventrally deflected. The axial area is narrow. The dorsal striae (25-28 in 10 µm) are parallel in the middle and slightly radiate near the ends (Figs. 28-29). They are composed of two rows of alternately arranged fine pores (Figs. 26-27). Each row contains between 69 and 76 pores in 10 µm. The striae on the distal dorsal side consist of transapically elongate slits (Fig. 26) and have approximately double the density as the striae dorsal side (47.5-52 in 10 µm). Although we have no internal SEM views of the valves, we can suppose that striae bifurcate at the junction between dorsal and distal dorsal sides. This is deduced from the stria arrangement and density in both regions (Fig. 26). Along the junction there is a hyaline longitudinal rib which interrupts the striae. (Figs. 26-28). The ventral striae (Fig. 26) are very similar to that of the distal dorsal side in structure and density (ca. 53 in 10 µm). They are formed of transapical slits, which become progressively shorter towards the central area. The raphe is straight throughout, except at the middle of the valve, where it becomes arched towards the dorsal side (Fig. 28). A raphe ledge exists only on the dorsal side, covering the proximal endings of the transapical striae. It is rather well-developed and biarcuate : widest in the centre and the ends of the valves (Figs. 28-29). It bears a line of transapically elongated slits (Fig. 26) placed along the dorsal side of the raphe fissure (ca. 52 in 10 µm). No shadow area raising from the central nodule appears in this morphotype even when phase contrast is used in LM. There is an irregular line of small warts or papillae running more or less parallel to the raphe on the dorsal side of the valva (Fig. 26).

This morphotype was collected on the sediment of the less saline pond (station 1, salinity : 40‰)

in summer 1994, when some macrophytes and macrophytic green algae began to develop in the lagoon : *Ruppia maritima* L., *Chaetomorpha* sp. and *Cladophora* sp. It could be an epiphyte, though we never saw it living on the macrophytes.

DISCUSSION

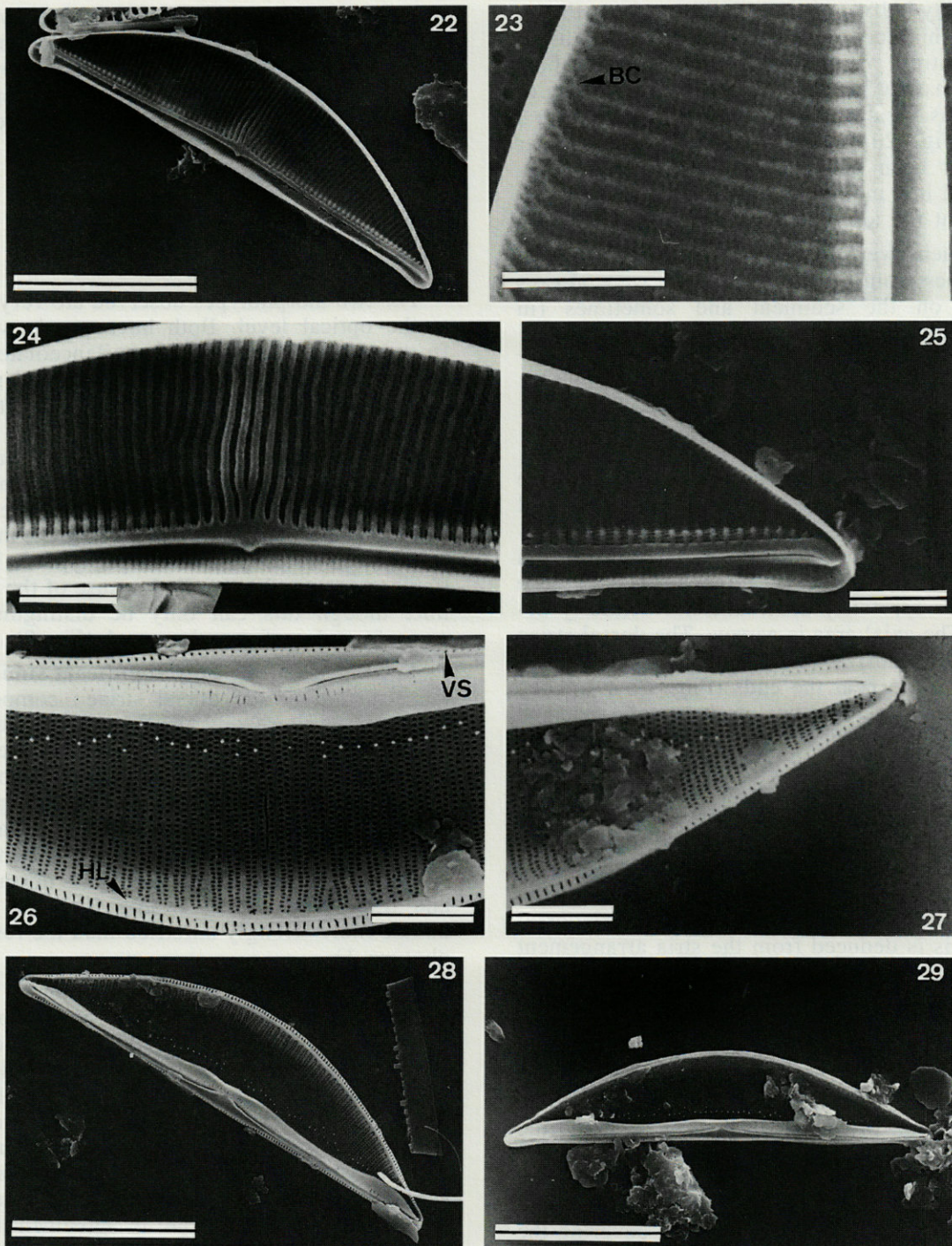
The two morphotypes observed are very similar at the optical level. Both have poorly silicified frustules, semielliptical to semilanceolate valves with nearly straight ventral margins and rounded acute ends, raphes running very close to the ventral margin, and dorsal and ventral striae that are hardly visible in LM (Figs. 2-13). The stria counts and size are also similar. However, morphotypes can be differentiated in LM by their valve outline (more semilanceolate in morphotype 2), the raphe ledge (well-developed in morphotype 2, but difficult to see), and specially because of the shadow line, though this can only be distinguished in some frustules of morphotype 1 (Fig. 8).

At SEM level, the only significant similarity is the structure of the dorsal striae : composed of two rows of alternately arranged pores. Otherwise it is at the ultrastructural level where the differences that appear to have taxonomic importance : the structure of the raphe ledge, the longitudinal rib in the junction between dorsal and distal dorsal side of the valve (morphotype 2), difference or similarity between ventral and distal dorsal striae, and transapical costae arising from the central nodule more strongly silicified than the rest (morphotype 1).

At the moment, the identification of one of these two taxa as *Amphora hyalina* is not possible, though we have studied the Kützing slide containing the type material. In fact, we have only found «something» that resembles a frustule of *A. hyalina*, but in a very poor condition. The only information that we can obtain, if this frustule is really the type specimen, is the shape (linear-lanceolate with truncate apices) and the size (24 × 12.8 µm). Both features are in agreement to those from our two morphotypes, despite its short valve length.

The original description (Kützing, 1844) is also a poor tool for the identification of *A. hyalina*, since it is very plain : «*A. hyalina, elliptico lanceolata, hinc acuta, illine truncata, lineis longitudinalibus delicatissimis pauis. - Long. 1/50-1/36*». In der Ostsee». The drawings that illustrate this description are of excellent quality, but too simple to obtain unequivocal identifications.

The difficulty to know what is the Kützing's concept of *A. hyalina* obviously is the cause of the divergences in the concept about this taxon



Figs. 22-29. – *Amphora aff. hyalina* (morphotypes 1 and 2), SEM. Fig. 22. Internal view of morphotype 1, scale bar = 10 μ m. Fig. 23. Internal view of morphotype 1, showing the bifurcation of the costae of the striae (BC), scale bar = 2 μ m. Figs. 24-25. Internal view of morphotype 1, scale bar = 2 μ m. Figs. 26-27. External views of morphotype 2, showing the ventral striae (VS) and the longitudinal rib between the dorsal and residuum sides (HL), scale bars = 2 μ m. Figs. 28-29. External views of taxon 2, scale bars = 10 μ m.

for different authors. Consulted references to *A. hyalina* are listed in Table I. According to these references, *A. hyalina* is a fairly polymorphic species: frustule length ranges from 20 μ m (Karayeva, 1987) to 106 μ m (Navarro, 1982); valve

breadth from 6 μ m (Karayeva, 1987) to 14 (Bérard-Therriault *et al.*, 1986); and dorsal striae in 10 μ m from 20 (Hendey, 1964) to 55 (Cleve, 1895). These wide ranges in morphometric characters has previously been emphasized by

Table I. – *A. hyalina* references. FL : frustule length, FB : frustule breadth, VB : valve breadth, DS : dorsal striae in 10 µm, VS : ventral striae in 10 µm, RS : residual striae in 10 µm.

Reference	FL	FB	VB	DS	VS	RS	Habitat-Locality
Kützing (1844)	50-70?						Ostsee
Cleve (1895)	50-80	-	-	23-55	-	-	Marine
Cleve-Euler (1953)	50-80	-	-	ca. 23	-	-	Marine
Hendey (1964)	40-55	-	-	20-22	-	-	Littoral. Freq. in plankton and beds of <i>Spartina</i> in estuarine conditions
Drum & Webber (1966)	-	-	-	-	-	-	Salt marsh in Massachusetts (USA) 0-22‰S.
Giffen (1967)	-	-	-	28-30	-	-	Oligo-mesohaline waters (East London, South Africa)
Aleem (1973)	-	-	-	-	-	-	Mud-flats near Göteborg and littoral pools at Amundön (Sweden)
Navarro (1982)	102-106	-	-	-	-	-	Marine, neritic, estuarine, tycopelagic, cosmop. in temperate-tropical waters
Kaczmarek & Rushforth (1983)	43-57	-	7-10	19-20	19-20	-	Warm waters, slightly salines (0.3-1‰S, Blue Lake, Utah, USA)
Rincé & Robert (1983)	-	-	-	-	-	-	"Vassieres" in salt work near Nantes (France)
Bérard-Therriault <i>et al.</i> (1986)	30-65	21-23	8-14	23-28	50	-	Marine, littoral (Québec, Canada)
Karayeva (1987)	20-32	-	6-10	32	-	75-80	Caspian Sea and Black Sea

Cholnoky (1961) and Tomas (1989). There is more agreement about other characters, the frustule is weakly siliceous or membranaceous and hardly visible in LM, the valves are more or less semi-elliptical, with nearly straight ventral valve margins, and the raphe is straight and close to the ventral margin. Both taxa recorded from «La Trinitat» salt fields display all these features, and, thus, they would both be identified as *A. hyalina*.

Two recent works have dealt with the ultrastructure of *A. hyalina*: Karayeva (1987) and Bérard-Therriault *et al.* (1986). They agree about the structure of the dorsal striae (composed of two rows of puncta) and the ventral striae (short and only formed of one row). The description presented by Karayeva (1987), for specimens collected from the Caspian Sea, is extremely valuable, because she thoroughly describes many ultrastructural characters useful to identification. Apart from the structure of the striae, the populations studied from the Caspian Sea can be characterized by the presence of a well developed raphe ledge and a hyaline longitudinal rib between the dorsal and distal dorsal sides. Moreover, her specimens have the striae on the distal dorsal side of the valve composed of transapically elongated slits and the costa of the central striae are not enlarged. Thus, no transapical shadow appears in the middle of the valve.

In view of the taxonomic confusion we have described, it is difficult to make any confident statement about *Amphora hyalina*. However, ac-

ording to Karayeva (1987) and also Bérard-Therriault *et al.* (1986), we can see that our morphotype 2 is the best related with their concept of this taxon. Morphotype 1 is too different ultrastructurally to belong to the same taxon as morphotype 2, though there are the possibility that both morphotypes are stages in the life cycle of the same organism. They might also be two phenotypes of the same taxon depending on the water salinity or even other environmental parameters. We are almost convinced that they really are two different taxa, but, of course, this statement need to be proved. The autoecology of these morphotypes in «La Trinitat» salt fields may provide a clue, since they have been found over different ranges of salinities. This is probably a good indication that two different taxa are involved.

It is obvious that *A. hyalina* cannot actually be considered a good indicator of environmental conditions as might be water salinity. This taxon is not well established and there is still uncertainty about its identity. It is possible that different taxa have been all identified as *A. hyalina*, and the type material is not very useful to solve this divergences. *A. hyalina* is only an example of this big problem. The same comments are possible to say about many small or delicate *Amphora* from marine or hypersaline habitats. In this way, we think it is necessary to pay more attention on the taxonomy and autoecology of these organisms, specially because of their ecologic importance in saline environments.

REFERENCES

- ALEEM A.A., 1973. Contributions to the study of littoral diatoms on the West Coasts of Sweden. *Botanica Marina*, **16** : 193-200.
- ARCHIBALD R.E.M. & F.R. SCHOEMAN, 1984. *Amphora coffeaeformis* (Agardh) Kützing : a revision of the species under light and electron microscopy. *S. Afr. J. Bot.*, **3** : 83-102.
- ARCHIBALD R.E.M. & F.R. SCHOEMAN, 1985. *Amphora hybrida* Grunow (Bacillariophyceae) – its identity and taxonomy. *Nova Hedwigia*, **41** : 159-166.
- BÉRARD-TERRIAULT L., A. CARDINAL & M. POULIN, 1986. Les diatomées (Bacillariophyceae) benthiques de substrats durs des eaux marines et saumâtres du Québec. 6. Naviculales : Cymbellaceae et Gomphonemaceae. *Naturaliste can. (Rev. écol. Syst.)*, **113** : 405-429.
- CHOLNOKY B.J., 1961. Ein Beitrag zur Kenntnis der Diatomeenflora der venetianischen Lagunen. *Hydrobiologia*, **17**(4) : 287-325.
- CLEVE P.T., 1895. Synopsis of the naviculoid diatoms. *K. svenska VetenskAkad. Handl.*, **27** : 1-219.
- CLEVE-EULER A., 1953. Die Diatomeen von Schweden und Finnland. *K. svenska Vetensk Acad. Handl. Fjärde Ser.*, **4** : 1-232.
- DRUM R.W. & E. WEBBER, 1966. Diatoms from a Massachusetts Salt Marsh. *Botanica Marina*, **9** (1-2) : 68-77.
- EHRlich A., 1975. The diatoms from the surface sediments of the Bardawil Lagoon (northern Sinai). Paleocological significance. *Nova Hedwigia Beiheft*, **53** : 253-280.
- EHRlich A. & I. DOR, 1985. Photosynthetic microorganisms of the Gavish Sabkha. In : *Hypersaline Ecosystems. The Gavish Sabkha. Ecological Studies*, **53** : 296-321.
- GIFFEN M.H., 1967. Contributions to the diatom flora of South Africa. III. Diatoms of the marine littoral regions at Kidd's Beach near East London, Cape Province, South Africa. *Nova Hedwigia*, **13** (1-2) : 245-292.
- HENDEY N.I., 1964. An introductory account of the smaller algae of British coastal waters. Part V. Bacillariophyceae (Diatoms). Her Majesty's Stationary Office. London. 317 p.
- JOHN J., 1981. *Amphora australiensis* sp. nov. *Nova Hedwigia*, **35** : 39-53.
- KARAYEVA N.I., 1987. Some species of the genus *Amphora* Ehr. in the Caspian Sea. *Arch. Protistenkd.*, **133** : 93-109.
- KACZMARSKA I. & S.R. RUSHFORTH, 1983. The diatom flora of Blue Lake Warm Spring, Utah, U.S.A. *Bibliotheca Diatomologica*, **2** : 1-49.
- KÜTZING F.T., 1844. Die Kieselschaligen Bacillarien oder Diatomeen, W. Köhne, Nordhausen. 152 p., 30 pl.
- LEE K. & F.E. ROUND, 1987. Studies on freshwater *Amphora* species. I. *Amphora ovalis*. *Diatom Research*, **2**(2) : 193-203.
- MANN D.G., 1994. The systematics of amphoroid diatoms : the life history of *Amphora arcus*. *Nova Hedwigia*, **58** (3-4) : 335-352.
- NAVARRO J.N., 1982. A survey of the marine diatoms of Puerto Rico. V. Suborder Raphidineae : Families Achnanthaceae and Naviculaceae (excluding *Navicula* and *Mastogloia*). *Botanica Marina*, **25** : 321-338.
- REMANE A., 1971. Ecology of brackish water. In : *Die Binnengewässer*, vol. 22 part I, 1-210. A. Remane & C. Schlieper (eds.). Stuttgart.
- RINCE Y. & J.M. ROBERT, 1983. Evolution des peuplements de diatomées planctoniques et benthiques d'un marais salant lors des variations printanières de salinité. *Cryptogamie, Algologie*, **4** (1-2) : 73-87.
- SCHOEMAN F.R. & R.E.M. ARCHIBALD, 1984. *Amphora delphinea* L.W. Bailey : a light-microscopical study of the type and other authenticated material. *Bacillaria*, **7** : 91-109.
- TOMÁS X., 1989. Diatomeas de las aguas epicontinentales saladas del litoral mediterráneo de la Península Ibérica. PhD. Univers. Barcelona, 714 p.
- VANLANDINGHAM S.L., 1967. Catalogues of the fossil and recent genera and species of diatoms and their synonyms, vol. I. J. Cramer (ed.), Lehre.

Reçu le 14 décembre 1994; received December 14, 1994

Accepté le 29 mai 1995; accepted May 29, 1995

COMMENT DISTINGUER *STEPHANODISCUS PARVUS* DE *STEPHANODISCUS MINUTULUS*?

*How to distinguish Stephanodiscus parvus Stoermer & Hakansson from
Stephanodiscus minutulus (Kütz.) Cleve & Möller?*

C. CORNET et J. SUBIRES

Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Département de Géologie,
rue de Bruxelles 61, B-5000 Namur, Belgique

BACILLARIOPHYCEAE
DIATOMES
TAXONOMIE
STEPHANODISCUS MINUTULUS
STEPHANODISCUS PARVUS

RÉSUMÉ – Un petit *Stephanodiscus* (diamètre 4 à 11 μm) a été observé au cours de l'étude des sédiments postglaciaires du Holzmaar (Eifel, Allemagne). Au MEB, alors que la plupart des spécimens montre une valve relativement plate, des formes nettement ondulées ne sont pas rares. En accord avec les descriptions antérieures, la première forme serait appelée *Stephanodiscus parvus* Stoermer & Håkansson, l'autre *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cleve & Möller. Or au sein des assemblages observés, l'amplitude de l'ondulation de la face valvaire peut varier continûment. Mis à part le critère de forme, l'ultrastructure de ces deux taxons est identique. Se pose dès lors le problème de l'identification et de la séparation de ces deux espèces.

BACILLARIOPHYCEAE
DIATOMS
TAXONOMY
STEPHANODISCUS MINUTULUS
STEPHANODISCUS PARVUS

ABSTRACT – A very small *Stephanodiscus* (4-11 μm in diameter) was recorded during our investigation on Lateglacial sediments from lake Holzmaar (Eifel, Germany). According to the flatness or to the elevation/depression of the central area, two entities are distinguished in the literature i.e. *Stephanodiscus parvus* Stoermer & Håkansson and *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cleve & Möller. A continuous series in the degree of undulation of the valve face exists, but the observations of valve morphology employing SEM reveal that the structure is identical. This investigation shows the identification and the separation of these species have not yet been resolved.

INTRODUCTION

En Allemagne, le lac du Holzmaar (Fig. 1) se situe dans l'Eifel occidental (50°7'N, 6°53'E). De forme quasi circulaire, il occupe un cratère d'origine phréatomagmatique. Un niveau de cendres volcaniques est intercalé dans la séquence sédimentaire du lac. Il s'agit du Laacher See Tuff (LST), un horizon repère pour l'Europe puisqu'il est présent de la Scandinavie jusqu'aux Alpes. Les datations au ^{14}C indiquent que l'âge des éruptions du Laacher See se situe vers 11 000 B.P. (Bogaard & Schmincke, 1985).

Nous nous sommes intéressés aux sédiments postglaciaires déposés avant et après le LST. De

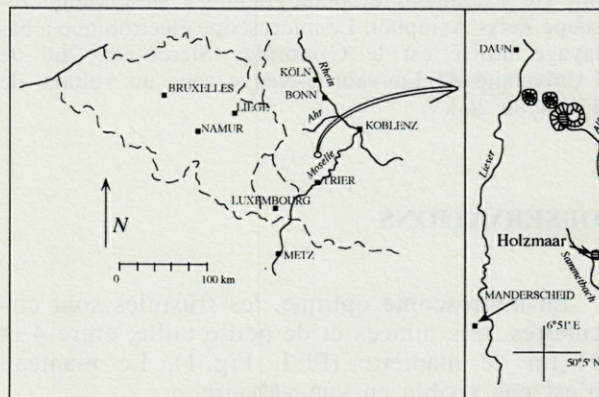


Fig. 1. – Carte de situation du Holzmaar.
Location map of the Holzmaar.

petites Diatomées centrées sont omniprésentes dans presque tous les échantillons. Elles peuvent être identifiées soit comme *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cleve & Möller, 1878, soit comme *Stephanodiscus parvus* Stoermer & Håkansson, 1984. Etant donné que leur fréquence relative peut atteindre jusqu'à 83 % de l'assemblage diatomique (Fig. 2), une identification précise s'imposait avant de proposer une interprétation paléocéologique du site.

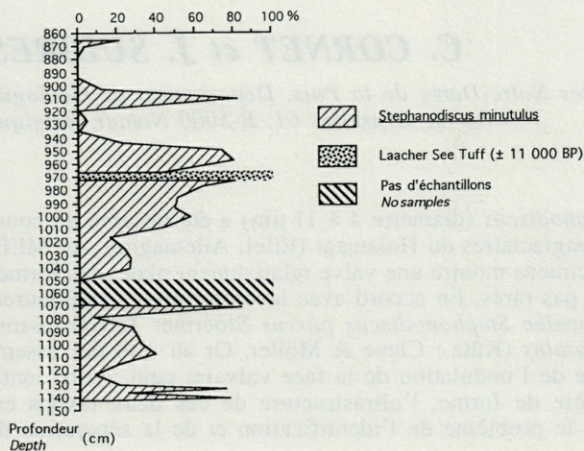


Fig. 2. — Holzmaar. Fréquence relative du petit *Stephanodiscus*.

Holzmaar. Relative frequency of the small *Stephanodiscus*.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les sédiments lacustres du Holzmaar ont été prélevés par l'équipe du Professeur Negendank (Université de Trèves) à partir d'un radeau au centre du lac à l'aide d'une sonde de type Usinger (Zolitschka, 1992).

Les observations morphologiques des Diatomées ont été réalisées sur des frustules débarrassés de leur matière organique par traitement à l'eau oxygénée. Elles ont été examinées et photographiées au Photomicroscope Zeiss Axiophot. Le microscope électronique à balayage utilisé est le Cambridge Stereoscan 260 de l'Université de Louvain-la-Neuve sous un voltage de 15 kV ou 20 kV.

OBSERVATIONS

En microscopie optique, les frustules sont circulaires, très minces et de petite taille, entre 4 et 11 μm de diamètre (Pl. I, Fig. 1). Le manteau n'est pas visible en vue valvaire.

L'ondulation concentrique de la surface valvaire est difficilement observable au microscope

optique, surtout pour les frustules de petite taille, ce qui est le cas ici.

En microscopie électronique à balayage, la surface valvaire apparaît plate (Pl. I, Fig. 5; Pl. II, Fig. 2) ou légèrement ondulée (Pl. I, Fig. 3) jusqu'à nettement ondulée (Pl. I, Fig. 4). L'ornementation de la valve consiste en faisceaux rayonnants constitués de 2, parfois 3 rangées d'aréoles à la périphérie. Elles deviennent unisériées et/ou se désorganisent vers le centre de la valve. Chaque faisceau est séparé par un interfaisceau radiaire bien distinct. Ce dernier porte une épine bien développée à son extrémité marginale.

Des processus renforcés (*fultoportulae*) marginaux se situent directement sous les épines. Ils n'en sont pas séparés par des aréoles (Pl. II, Fig. 2). Ils sont présents tous les 3 à 6 interfaisceaux.

En vue interne, chaque processus renforcé marginal est entouré de 3 pores satellites (Pl. I, Fig. 5). La vue interne du frustule montre clairement un processus renforcé (*fultoportula*) légèrement excentrique garni de 2 pores satellites (Pl. I, Figs. 5-6).

Un processus labié (*rimoportula*) existe sur un interfaisceau dans la direction quasi opposée au processus renforcé excentrique (Pl. I, Fig. 6). Il se situe à la place d'une épine marginale (Pl. II, Figs. 1-2). Son ouverture extérieure est tubulaire. En vue interne, la fente longitudinale du processus labié est orientée obliquement par rapport à l'axe radiaire de l'interfaisceau (Pl. I, Fig. 6).

Le manteau valvaire est très étroit. Chaque strie du manteau est composée de 3 aréoles et de seulement 1 (ou 2) aréole(s) sous le processus renforcé marginal (Pl. I, Figs. 2-3; Pl. II, Fig. 2).

Des formes fortement silicifiées ont été observées. Dans ce cas, l'ouverture extérieure des aréoles est réduite et tend à être partiellement occluse extérieurement (Pl. II, Figs. 3-4).

DISCUSSION

Stephanodiscus parvus a été décrit par Stoermer et Håkansson (1984). La structure interne n'y est pas clairement expliquée, notamment en ce qui concerne le processus labié. Qui plus est, plusieurs confusions relatives aux figures sont présentes (Håkansson & Stoermer, 1988; Kobayasi *et al.*, 1985). En 1993, Yang et Duthie complètent la description de *Stephanodiscus parvus*.

Pour *Stephanodiscus minutulus*, Round (1981, légende de la Fig. 24) note la présence de 2 pores satellites entourant le tube intérieur des processus renforcés marginaux.

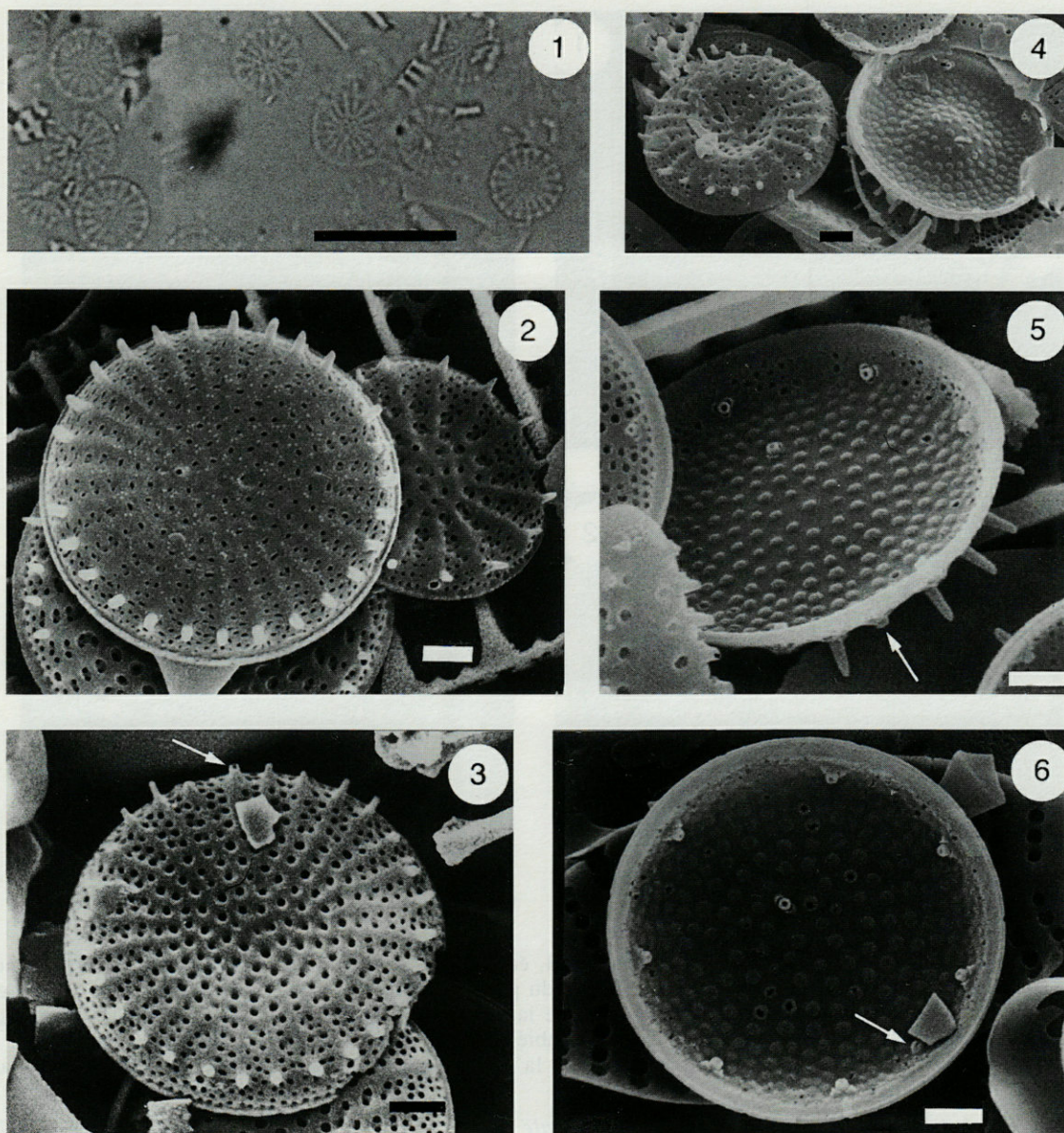


Planche I. – Figs. 1-6. *Stephanodiscus minutulus*. Fig. 1., échelle = 10 μm . Figs. 2-6. MEB, échelle = 1 μm . Figs. 2-6. Gradations du degré d'ondulation de la surface valvaire depuis une surface plate (Figs. 2-5), modérément (Fig. 3) et fortement ondulée (Fig. 4). Fig. 5. Surface valvaire interne montrant les trois pores satellites des processus renforcés marginaux et les deux pores satellites du processus renforcé légèrement excentrique (vue oblique) (flèche = ouverture externe du processus labié). Fig. 6. Vue interne de la valve montrant le processus renforcé excentrique possédant deux pores satellites, les processus renforcés marginaux où seulement deux pores satellites sont visibles et le processus labié (flèche).

Plate I. – Figs. 1-6. *Stephanodiscus minutulus*. Fig. 1. LM, scale bar = 10 μm . Figs. 2-6. SEM, scale bar = 1 μm . Figs. 2-4. Gradations of the undulation of the valve face from flat valve (Figs. 2-5), moderately (Fig. 3) and strongly undulate valves (Fig. 4). Fig. 5. Internal valve margin showed the marginal strutted processes with three struts and the excentric strutted process with two struts (oblique view) (arrow = external opening of the labiate process). Fig. 6. Inner view of valve showing the excentric strutted process with two struts, the marginal strutted processes (only two struts are visible) and the labiate process (arrow).

D'après Håkansson et Kling (1990), ce ne sont pas 2 mais 3 pores satellites qui entoureraient les processus renforcés marginaux. C'est pourquoi ils décrivent dans ce même article, un *Stephanodiscus* cf. *minutulus* après observation de 2 pores satellites autour de tous les processus renforcés.

Les frustules du Holzmaar en possèdent 3, tout comme les spécimens japonais observés par Kobayasi *et al.* (1985). Ces auteurs supposent que le mauvais état de préservation du matériel observé par Round puisse expliquer cette différence.

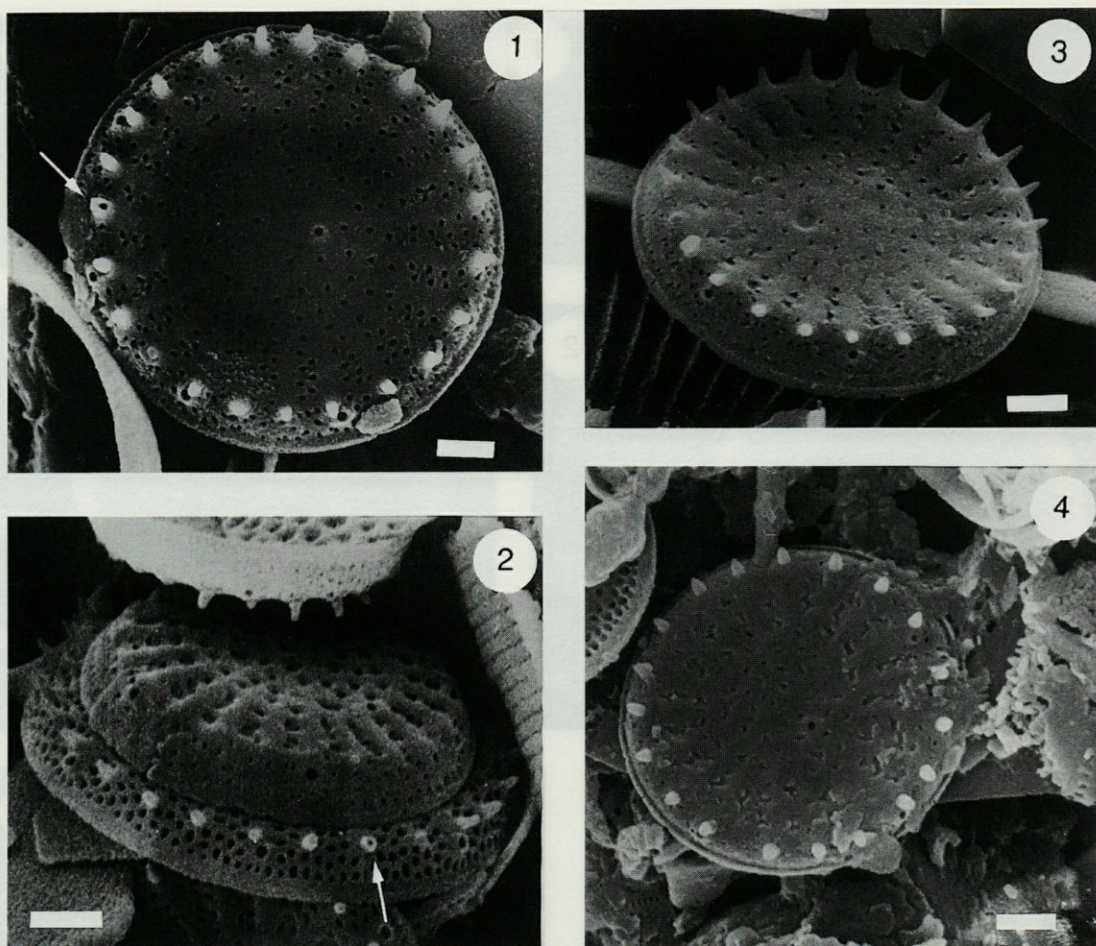


Planche II. – Figs. 1-4. – *Stephanodiscus minutulus*. MEB, échelle = 1 μ m. Fig. 1. Vue externe de la valve montrant les processus renforcés marginaux, l'ouverture extérieure du processus labié (flèche), les épines et l'ouverture externe du processus renforcé excentrique. Fig. 2. Vue externe de la valve montrant le manteau valvaire, les processus renforcés marginaux, l'ouverture extérieure du processus labié (flèche) et la disposition régulière des épines. Fig. 3. Valve légèrement ondulée et fortement silicifiée montrant la réduction de taille de l'ouverture extérieure des aréoles. Fig. 4. Forme tératologique.

Plate II. – Figs. 1-4. *Stephanodiscus minutulus*. SEM, scale bar = 1 μ m. Fig. 1. Outside view of valve showing the marginal strutted processes, the outer opening of the labiate process (arrow), the spines and the external opening of the excentric strutted process. Fig. 2. Outside view of valve showing the valve mantle, the marginal strutted processes, the outer opening of the labiate process (arrow) and the regular disposition of the marginal spines. Fig. 3. Slightly undulate and heavily silicified valve showing the reducing in size of the exterior opening of each areole. Fig. 4. Teratological form.

Un autre facteur explicatif de cette divergence peut être fourni par l'angle de vue. Comme le manteau est séparé de la surface valvaire par un angle très net, l'observation des 3 pores satellites n'est pas toujours possible (Pl. I, Fig. 6). Elle nécessite une vue oblique (Pl. I, Fig. 5).

L'ondulation concentrique de la surface valvaire est le seul critère important retenu par les taxonomistes (Krammer & Lange-Bertalot, 1991; Klee & Steinberg 1987; Håkansson, 1993) pour distinguer *Stephanodiscus parvus* Stoermer & Håkansson et *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cleve & Möller : une surface plate ou relative-

ment plate caractérise la première espèce, une surface ondulée (que la zone centrale soit bombée ou en dépression) la seconde espèce.

Mais lorsque des valves plates et ondulées coexistent dans le matériel, il devient difficile de séparer les deux espèces d'après ce critère : lorsque la surface est légèrement ondulée, s'agit-il encore de *Stephanodiscus parvus* ou déjà de *Stephanodiscus minutulus*? Les illustrations de l'article de Genkal et Håkansson (1990) montrent certains spécimens très peu ondulés identifiés comme *Stephanodiscus minutulus*.

L'ultrastructure des frustules, identique quel que soit le degré d'ondulation, n'apporte aucun critère de différenciation. C'est pourquoi, l'idée que l'ondulation concentrique de la surface valvaire pourrait n'être qu'une des modalités du polymorphisme de *Stephanodiscus minutulus* et donc *Stephanodiscus parvus*, un de ses morphotypes, n'est pas dénuée d'intérêt. Ces deux espèces seraient dès lors conspécifiques, comme cela a été proposé par Kobayasi *et al.* (1985). Håkansson et Kling (1990) se demandent en effet si l'ondulation de la surface valvaire constitue un critère suffisamment important pour différencier *Stephanodiscus minutulus* et *Stephanodiscus parvus*.

Par ailleurs, Kiss (1988) considère le nom *Stephanodiscus parvus* comme illégitime car il couvre les espèces *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cleve & Möller et *Stephanodiscus invisitatus* Hohn et Hellerman. Mais *Stephanodiscus invisitatus* ferait partie des *Cyclostephanos* (Theriot, Stoermer & Håkansson 1987).

Nos observations et le dépouillement bibliographique montrent que l'identification de ces petits *Stephanodiscus* n'est guère résolue. Dans le cadre de l'étude du Holzmaar qui nous intéresse, ils avaient été initialement identifiés, sous réserves, comme *Stephanodiscus parvus* (Subires, 1992). Suite aux discussions qui ont eu lieu lors du 13^e colloque de l'ADLAF en 1994, il semble que l'appellation *Stephanodiscus minutulus* soit plus correcte. Remarquons également que ce même site a été étudié par Lotter A.F. qui les décrit d'abord comme *Stephanodiscus parvus* (Lotter & Zolitschka, 1991), puis comme *Stephanodiscus cf. parvus* (Birks & Lotter, 1994).

La ressemblance morphologique de ces deux espèces permet d'expliquer les difficultés et les confusions quant à leur identification. Sans doute, des études portant sur la variabilité de l'ondulation valvaire, réalisées sur différentes populations, pourraient permettre de trancher définitivement quant au statut taxonomique de ces deux taxons.

REMERCIEMENTS – Les illustrations en microscopie électronique à balayage ont été réalisées grâce à la très aimable aide du Dr. M. Coen de Louvain-la-Neuve. Nous l'en remercions vivement.

REFERENCES

- BIRKS H.J.B. and A. LOTTER 1994. The impact of the Laacher See Volcano (11 000 yr B.P.) on terrestrial vegetation and diatoms. *Journal of Paleolimnology* **11** : 313-322.
- BOGAARD P. and H.-U. SCHMINCKE 1985. Laacher See Tephra : A widespread isochronous late Quaternary tephra layer in central and northern Europe. *Geol. Soc. Amer. Bull.* **96** : 1554-1571.
- GENKAL S.I. and H. HÅKANSSON 1990. The problem of distinguishing the newly described diatom genus *Pseudostephanodiscus*. *Diatom Research* **5** (1) : 15-23.
- HÅKANSSON H., 1993. Proceed. Fourth Artic-Antarctic Diatom Sympos. (Workshop), Canadian Museum of Nature, Ottawa, Ontario, Canada, Sept. 18-21, p. 139.
- HÅKANSSON H. and H. KLING 1990. The current status of some very small freshwater diatoms of the genera *Stephanodiscus* and *Cyclostephanos*. *Diatom Research* **5** (2) : 273-287.
- HÅKANSSON H. and E.F. STOERMER, 1988. A note on a centric diatom *Stephanodiscus parvus*. *Diatom research* **3** (2) : 267.
- KISS K.T. 1988. The morphology and taxonomy of *Stephanodiscus invisitatus* Hohn et Hellerman (Bacillariophyceae). *Arch. Protistenkd.* **135** : 187-196.
- KLEE R. and Ch. STEINBERG 1987. Kieselalgen Bayerischer Gewässer. Informationsberichte Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft.
- KOBAYASI H., H. KOBAYASHI and M. IDEI 1985. Fine structure and taxonomy of the small and tiny *Stephanodiscus* (Bacillariophyceae) species in Japan. 3. Co-occurrence of *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Round and *S. parvus* Stoerm. & Hak. *Jap. J. Phycol.* **33** : 293-300.
- KRAMMER K. and H. LANGE-BERTALOT 1991. Bacillariophyceae : 3. Teil : Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. *Sübwasserflora von Mitteleuropa*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- LOTTER A.F. and B. ZOLITSCHKA 1991. Pollen and diatom succession at the transition Alleröd-Younger Dryas in the varved sediment of Holzmaar. Symposium on Paleolimnology of Maar Lakes, Abstracts, Bitburg, May 21-25, p. 38.
- ROUND F.E. 1981. The diatom genus *Stephanodiscus* : an electron-microscopic view of the classical species. *Arch. Protistenk.* **124** : 455-470.
- STOERMER E.F. and H. HÅKANSSON, 1984. *Stephanodiscus parvus* : validation of an enigmatic and widely misconstrued taxon. *Nova Hedwigia* **39** : 497-511.
- SUBIRES J. 1991. Les diatomées du Holzmaar (Eifel occidental). Passage Tardiglaciaire-Postglaciaire. Mémoire de licence, Université de Louvain-La-Neuve (inédit).
- THÉRIOT E., E. STOERMER and H. HÅKANSSON 1987. Taxonomic interpretation of the rimoportula of freshwater genera in the centric diatom family *Thalassiosiraceae*. *Diatom Research* **2** (2) : 251-265.
- YANG J.-R. and H.C. DUTHIE 1993. Morphology and ultrastructure of teratological forms of the diatoms *Stephanodiscus niagarae* and *S. parvus* (Bacillariophyceae) from Hamilton Harbour (Lake Ontario, Canada). *Hydrobiologia* **269/270** : 57-66.
- ZOLITSCHKA B. 1992. Climatic change evidence and lacustrine varves from maar lakes, Germany. *Climate Dynamics* **6** : 229-232.

Reçu le 17 novembre 1994 ; received November 17, 1994
 Accepté le 9 janvier 1995 ; accepted January 9, 1995

COSCINODISCUS DISPAR PERAGALLO AND HÉRIBAUD

KAREN K. SERIEYSSOL

The American University of Paris, 31 Av. Bosquet, Paris, France

DIATOMS
MORPHOLOGY
CENTRICS
MIOCENE
PLIOCENE

ABSTRACT – *Coscinodiscus dispar* Héribaud described by Héribaud in 1893 has been reported from Miocene, Pliocene sites of France. A detailed light and scanning electron microscope study was undertaken to determine a description of the species. *Coscinodiscus dispar* Héribaud does not fit in any of the known fossil genera and this is discussed.

DIATOMÉES
MORPHOLOGIE
CENTRIQUES
MIOCÈNE
PLIOCÈNE

RÉSUMÉ – *Coscinodiscus dispar* Héribaud, décrit par F. Héribaud en 1893, a été trouvé dans le Miocène et le Pliocène de France. Une étude détaillée en microscopie optique et en microscopie électronique à balayage a mis en évidence les caractères ultrastructuraux de l'espèce. Une discussion basée sur les caractères ultrastructuraux de *Coscinodiscus dispar* Héribaud montre pourquoi cette espèce n'appartient pas aux genres fossiles connus.

INTRODUCTION

In order to compile a biostratigraphy of France, it is important to have a detailed knowledge of the different species contained within the different deposits. Therefore, a detailed examination of the different species using the light and scanning electron microscopes was undertaken. One species reported from Miocene, Pliocene deposits is *Coscinodiscus dispar* Héribaud.

Coscinodiscus dispar was first described by Héribaud (1893) from fossil material near Puy-de-Dôme (Massif Central, France). After describing the species, he stated the species was found in material coming from the Dépôt de Varennes no. 2 where it was very common and a characteristic species of this deposit. In 1903, Héribaud wrote that *Coscinodiscus dispar* and its varieties are one of the most common species found in the Dépôt de Fauouilhoux. The Varennes sediments were not found in the Héribaud collection at the British Museum (Natural History), but examination of the Fauouilhoux material found that *C. dispar* was present in a sample labeled Fauouilhoux 3092. Therefore, this material was used to determine the characteristics of *Coscinodiscus dispar*.

MATERIAL AND METHODS

The French material collected by Héribaud and labeled Fauouilhoux 3092 comes from an explosion crater located near the city of Murat. Several names have been used by different authors (Héribaud 1893, 1903; Fournier 1965; Gasse and Serieyssel 1991; Göer de Herve et Tempier, 1991; Serieyssel 1993) for the same site: Fauouilhoux, Sainte Reine, Murat, and Auxillac. The most commonly used name is that of Auxillac. The Auxillac diatomite is cut by a basalt intrusion that has been dated at 5.34 ± 0.30 Ma. (Rey 1975). This places the formation of the diatomite at the end of the upper Miocene – beginning of the Pliocene.

The sample was cleaned using the method described in Serieyssel (1993). The cover slips for the light microscope (LM) were mounted with Naphrax. The scanning electron micrographs (SEM) were taken on a Jeol JSM 841A after standard coating and mounting procedures.

RESULTS

Coscinodiscus dispar Peragallo and Héribaud in Héribaud (1893).

The valves are circular, almost flat varying in diameter between 3 and 14 μm . Valve face are-

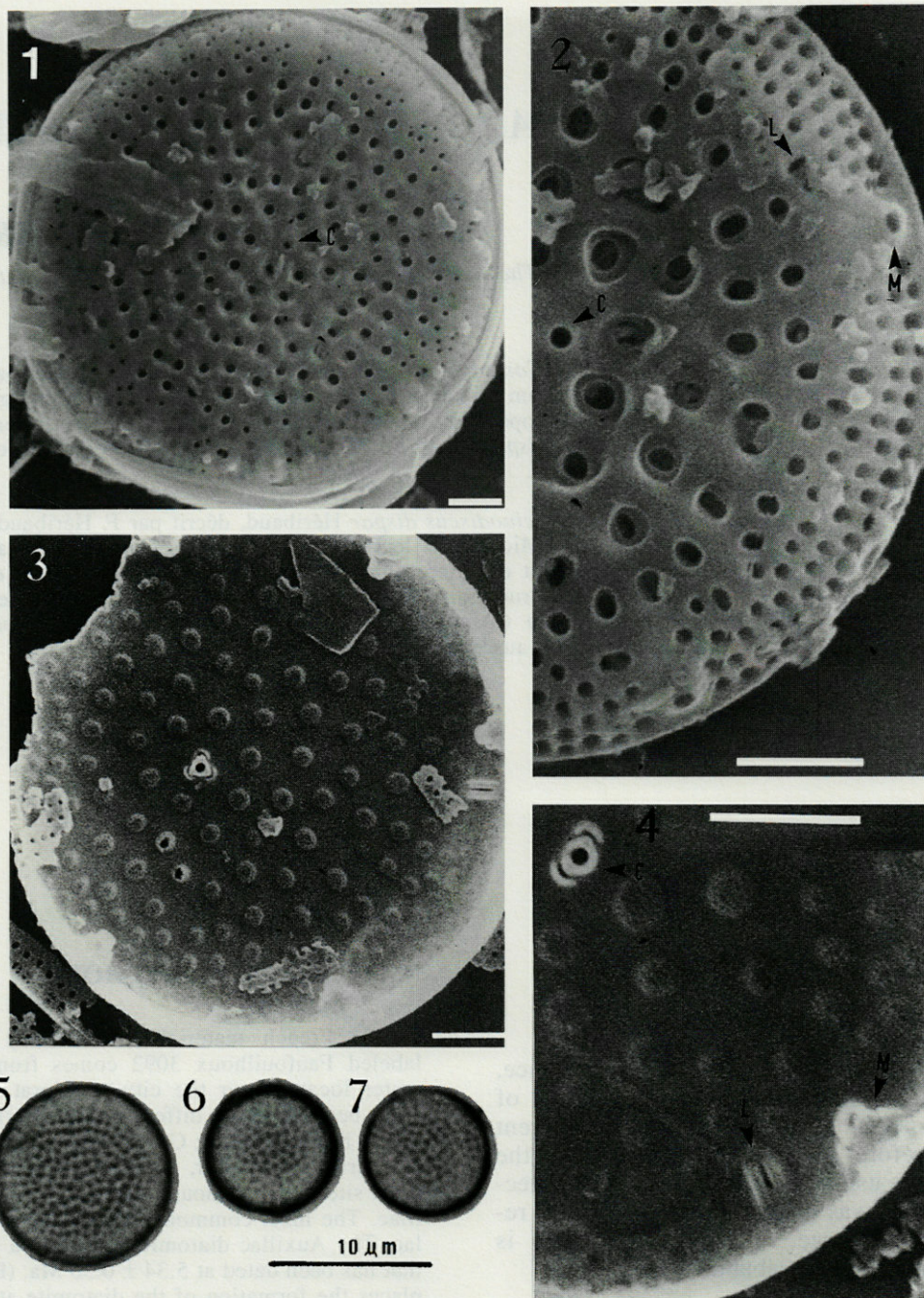


Plate 1. — Figs. 1 to 7. *Coscinodiscus dispar* Peragallo and Héribaud. Figs. 1 to 4. SEM. Scale bars = 1 μm . 1 = labiate process, c = central strutted process, m = marginal strutted process. Figs. 5 to 7. LM. Scale bar = 10 μm .

olae, clearly visible in the LM, are arranged in radial rows with the larger areolae in the center and decreasing in size towards the margin (Pl. I, Figs. 1 & 2). The valve face areolae are covered on the internal face by domed cribra, visible in the SEM (Pl. I, Figs. 3 & 4). There is a distinct break between the valve face areolae and those of the mantle (Pl. I, 1, 20). The mantle pores are smaller in size and arranged in linear rows (Pl. I,

2). The marginal strutted processes, present on every third to fourth striae, are large in size and have a relatively large extension of the process towards the center (Pl. I, 3 & 4). The number of satellite pores could not be determined but at least two could be observed. The external expression of the marginal strutted process is marked by an interruption of the mantle alveoli and by a slight doming of the silica around the pore (Pl. I, 2). One

slightly excentric central strutted process was noted with either two or three satellite pores (Pl. I, 1, 2, 3, 4). A sessile labiate process is situated at the valve face mantle border and is located on the opposite half of the valve from the central strutted process. The labiate process appears on the external face as an elongated slit situated at the valve face – mantle junction near a marginal strutted process. The external extension of the labiate process (typical of the genus *Stephanodiscus*) is lacking.

DISCUSSION

If we accept the expanded definition of Thalassiosiraceae Lebour emend. Hasle, used by Theriot and Bradbury (1987), then this species best belongs to the family Thalassiosiraceae, based on the presence of strutted processes. However, there is a problem fitting the species into the main freshwater genera of this family. The species cannot be added to the genus, *Mesodictyon*, by the presence of areolae with raised or domed internal cribra, because *Mesodictyon* has been defined as having loculate areolae, each having a cribrum inside the loculus and a foramen on both the internal and external valve surfaces (Theriot and Bradbury, 1987). *Coscinodiscus dispar* also has a central strutted process; a character that has not been observed on the known species of *Mesodictyon*.

Coscinodiscus dispar could belong to any of the following genera, *Cyclotella*, *Cyclostephanos* and *Stephanodiscus*, by the presence of raised or domed cribria on the internal valve face. But, both *Cyclotella* and *Cyclostephanos* have alveolar chambers which this species does not have. It differs from *Stephanodiscus* by the lacking the fasciculate radial areolae, an external tubulus on the labiate process and the external tubulus on the marginal strutted processes.

ACKNOWLEDGEMENTS – I would like to thank Dr. F. Gasse for constructive discussions and for allowing me to work in the Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopique, Université Paris-Sud and the Laboratoire de Micropaléontologie, Université Paris VI for allowing me to use their SEM. I would also like to thank Mr. P. Blanc for his assistance with the SEM.

REFERENCES

- FOURNIER F. (GASSE), 1965. Etude de quelques gisements diatomifères d'Auvergne, Faculté des Sciences d'Orsay, D.E.S.
- GASSE F and K. SERIEYSSOL, 1991. Diatomées néogènes du Massif Central français : quelques faits biostratigraphiques. *C. R. Acad. Sci. Paris* **312**, Sér. II : 957-964.
- GOER H.A. DE et P. TEMPER, 1991. Carte géologique à 1/50 000, St-Flour, B.R.G.M., Orléans.
- HÉRIBAUD J., 1893. Les Diatomées d'Auvergne. Ed. Librairie des Sciences Naturelles, Clermont-Ferrand, 255 p., 8 pl.
- HÉRIBAUD J., 1903. Les Diatomées fossiles d'Auvergne (Second Mémoire). Ed. Librairie des Sciences Naturelles, Clermont-Ferrand, 166 p., 4 pl.
- REY R., 1975. Premières données radiométriques relatives à l'âge du niveau pollinique de Reuver. *C.R. Acad. Sc. Paris*, **281** : 503-505.
- SERIEYSSOL K.K., 1993. Les Diatomées des sédiments lacustres d'âge Miocène supérieur d'Andance et Rochessauve (Ardèche). Paléoécologie et Biostratigraphie. Thèse Univ. Paris 6, 311 p.
- THERIOT E., J.P. BRADBURY, 1987. *Mesodictyon*, a new fossil genus of the centric diatom family Thalassiosiraceae from the Miocene Chalk Hills Formation, western Snake River Plain, Idaho. *Micropaleontology*, **33** (4) : 356-367, 1-6 pls.

Reçu le 19 décembre 1994; received December 19, 1994
 Accepté le 2 juin 1995; accepted June 2, 1995

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE TAXONOMIQUE DES DIATOMÉES

Reconnaissance du vivant

Contribution to the taxonomy of diatoms Recognition in the living state

J. BERTRAND

42 rue de malvoisine, 45800 St Jean de Braye, France

BACILLARIOPHYCÉES
DIATOMÉES
CHLOROPLASTES
RECONNAISSANCE
TAXONOMIE
VIVANT

RÉSUMÉ – Après une étude minutieuse portant sur 28 espèces appartenant à 7 genres, Cox concluait en la possibilité d'une reconnaissance rapide des taxons à l'état vivant, tout au moins pour la famille des Naviculacées et à la nécessité de prendre en compte tous les aspects de la cellule vivante. Poursuivant ce travail, l'auteur à l'aide de 48 espèces appartenant à 20 genres, après avoir passé en revue les différentes inclusions de la cellule vivante et leur potentialité pour la reconnaissance du vivant, montrait les difficultés à obtenir et à décrire des éléments constants. Une approche rapide montre que pour les Diatomées d'eau douce on peut parvenir à l'espèce dans 15 % des cas seulement, mais par contre on parvient au genre dans 67 % des cas. La difficulté majeure provient presque uniquement de la perte d'une grande partie des informations fournies par le frustule qui ne sont pas remplacées par celles données par les chloroplastes à structure variable et les pyrénoides souvent indécélables à l'état vivant.

BACILLARIOPHYCEAE
DIATOMS
CHLOROPLASTS
RECOGNITION
LIVING

ABSTRACT – After a thorough study on 28 species among 7 genera, Cox concluded that a recognition of taxa in the living state was possible, at least with the Naviculacae and that it was necessary to take account of all the aspects of the living cells. Proceeding with this work, on 48 species included in 20 genera, after a survey of the various inclusions of the living cell on their potential for the determination of living diatoms, the author shows the problems in obtaining and describing steadfast elements. Concerning freshwater diatoms, a fast approach demonstrates that the determination to species is possible in only 15 % of the cases, whereas the determination of genus is possible in 67 %. The biggest difficulty essentially resides in the loss of a large part of data relative to the frustule, which are not substituted by those disclosed by variably structured chloroplasts and by the pyrenoids unrevealable when alive.

INTRODUCTION

La reconnaissance du vivant peut avoir deux sens dont les implications et les démarches sont différentes, nous distinguons :

Le Vivant (sensu stricto)

La Diatomée, cellule vivante, est observée complètement dans son cycle biologique et dans son environnement naturel ou en culture.

Le Vivant fixé (tué)

La Diatomée est à un moment précis de son cycle biologique. La fixation ayant pour but de conserver momentanément les éléments vitaux

constitutifs de la cellule dans leur intégralité. Dans le premier cas, seules sont admises les méthodes de traitement des messages lumineux : transmission et réflexion photonique, contraste de phase et interférentiel, polarisation, fluoroscopie dans certains cas, mesures dimensionnelles, méthodes histochimiques de coloration vitale et la micromanipulation.

Dans le deuxième cas, sont employées toutes les manipulations histochimiques avec ou sans coupe ainsi que la dilacération ; elles permettent de visualiser, si possible sans artefact, tous les composants vitaux de la cellule. Nous ne traiterons pas ce cas qui est bien connu et bien compris, quoique rarement utilisé lors de la description

d'une nouvelle espèce de Diatomée. Ces travaux pourraient apporter de nombreuses connaissances nouvelles mais certaines techniques sont difficiles à mettre en œuvre et maîtrisées entièrement seulement par quelques spécialistes : exemple, la recherche des formules chromosomiques.

Dans les premiers temps de l'observation des Diatomées, les chercheurs : Agardh (1816, 1824, 1830), Greville (1823, 1828), Kützing (1833, 1844, 1849) et Smith (1853, 1856), décrivaient entièrement les cellules vivantes comme nous le rappelle Cox (1980). Rapidement les taxonomistes abandonnèrent cette habitude pour se concentrer uniquement sur les frustules qui semblaient donner plus de garantie pour la classification. En 1902, Mereschkowsky, après les études approfondies sur des chloroplastes et les pyrénoides, se range également à cet avis qui nous conduit à l'état actuel. Toutefois, de nombreux problèmes restés en suspens concernent cette classification : séparation incertaine des genres et des espèces, création de genres inutiles etc. sans qu'il soit possible de trancher. Or, Cox (1980) s'élève contre cette attitude et tente de prouver la nécessité de considérer la cellule dans son entier. D'autre part, une connaissance directe sur le vivant serait un apport réel. Il nous est donc apparu indispensable :

— de faire un examen exhaustif de tous les éléments constitutifs de la cellule vivante ainsi que des arrangements cénobiaux.

— de bien circonscrire tous ceux qui sont accessibles uniquement à l'aide des moyens optiques, ceci dans le but de permettre une détermination la plus précise possible à l'état vivant.

MATERIEL - METHODE

Le matériel vivant a été récolté principalement dans le centre de la France. Toutefois, les quelques espèces d'eaux saumâtres proviennent des côtes de l'Atlantique (Noirmoutiers). Les observations ont été effectuées si possible immédiatement après la récolte. Dans le cas où l'éloignement était trop important, le matériel a été conservé pendant le transport dans une glacière à une température de 6 à 8° maximum. Les observations ont été effectuées en microscopie photonique sur Olympus BH2 muni d'un objectif plan achromatique Nikon X 40. Toutes les espèces ont été enregistrées simultanément en Vidéo VHS avec capteur d'images CCD couleur PAL, Biske F 12, moniteur couleur PAL Biske TVM 10 E et magnétoscope multistandard VHS PAL 498 SEG. Les photos couleur illustrant cet article ont été prises sur écran à partir des films vidéo en position « images fixes » au quart de seconde avec appareil photo Pentax LX, sur film couleur négatif 125 ASA Fujicolor.

OBSERVATIONS - ANALYSES

Le Tableau I montre les niveaux descriptifs qui permettent de parvenir à la connaissance complète de la Diatomée.

1. *Cenobe*

Concerne l'arrangement des colonies à l'état vivant, il indique par la méthode de préparation par grillage, que l'on peut accéder à cette connaissance dans 50% des cas avec certitude et 16% avec réserve. En effet il peut y avoir convergence de comportement et d'apparence entre genres comme les figures 1 à 4 l'indiquent, ce qui diminue la précision de la détermination.

2. *Cellules individuelles*

Permet sur le vivant, de distinguer les cellules possédant un raphé, donc mobiles, de celles n'en possédant pas et par conséquent immobiles. Mais il faut constamment avoir à l'esprit que de nombreuses monoraphidées se fixent à l'aide de mucus (*Achnanthes*, *Cocconeis*) et que le mouvement est lié au rythme nyctéméral de l'espèce et dépend de l'état physiologique de la cellule, d'où la nécessité de procéder à l'examen immédiatement après le prélèvement.

2A. *Frustule*

Est consacré à tous les aspects morphologiques du frustule qui servent de base pour la détermination de l'espèce et ses variations dans la taxonomie actuelle. Les deux méthodes de nettoyage des frustules (grillage et H₂O₂) donnent évidemment le maximum de précisions, quoique avec réserve pour les Diatomées n'ayant pas les mêmes décorations sur l'épivalve et l'hypovalve. Par comparaison, l'examen à l'état vivant n'est précis que pour 21% des cas et donne 21% de renseignements incertains. Nous avons donc une perte d'environ 80% des renseignements pour parvenir à l'espèce.

2B à 2H

Inclusions internes de la Diatomée vivante qui ne sont jamais prises en compte dans la méthode actuelle. Dans une première approche et sans entrer dans les détails, nous constatons que l'information utilisable ne correspond qu'à 35% des informations globales offertes par la cellule; 25% donnent des informations incertaines et 15% nécessitent des traitements spéciaux. Ces informations sont du domaine histochimique car les

observations en contraste de phase, sur les diatomées vivantes, donnent des résultats décevants. Surtout il est important de constater qu'aucune de ces informations ne peuvent être considérée comme constante à l'intérieur de l'espèce.

Nous pouvons dès lors éliminer certains organites potentiels : le noyau, le chondriome, les dictyosomes et les vacuoles qui sont du domaine histologique et de plus sont variables tant par le nombre que par les dimensions. Il ne nous reste donc que 2 éléments importants et facilement identifiables : les chloroplastes et les pyrénoides. Dans le tabl. I nous les avons par avance considérés comme variables à l'intérieur de l'espèce. Nous allons les examiner et justifier notre décision dans la série de 44 espèces contenues dans 19 genres. Dans son étude de 1980, Cox mettait en parallèle les chloroplastes des genres *Gyrosigma* et *Pleurosigma*. Elle insistait sur le fait que *G. acuminatum* possède toujours 2 lames plastidiales collées sur les parois connectives alors que dans *G. attenuatum*, elles envahissent partiellement, mais rarement, les parois valvaires. Ici nous constatons que les lames de *G. acuminatum*, bien que distribuées comme l'a décrit cet auteur, peuvent être décalées longitudinalement (Fig. 5) et même envahir la totalité de la face valvaire (Fig. 6). Nous retrouvons avec *G. attenuatum* (Fig. 7) la description de Cox, mais nous l'avons observée comme constante, et la couleur des plastes est en général plus brune que pour *G. acuminatum*. Par contre, tous les *G. balticum* (Fig. 8) que nous avons observées avaient les faces valvaires envahies par les lames plastidiales.

Quant au genre *Pleurosigma*, si nous sommes d'accord avec Cox pour *P. angulatum* (Fig. 9) par contre nous voyons que *P. salinarum* (Fig. 10) ressemble à *G. acuminatum* et il nous a fallu une préparation par grillage pour une détermination exacte. Le genre *Pinnularia* a été également bien étudié par Cox. Dans les exemples présentés ici, *P. neomajor* (Fig. 11) et *P. viridis* (Fig. 12) sont conformes aux descriptions de l'auteur. De même, la figure 13 montre une *P. nodosa* du type plastidial décrit par Cox alors que la figure 14 qui est également une *P. nodosa* ne révèle aucun chloroplaste. Dans la récolte dans laquelle étaient contenues ces cellules, 80% ne montraient aucun plaste car ceux-ci étaient masqués par des gouttes lipidiques qui envahissaient les cellules. On peut également rapprocher des formes capitées : *P. acrosphaeria* (Fig. 15), cependant les plastes sont du type *viridis* alors qu'ils devraient être du type *nodosa*, du moins dans les récoltes que nous avons examinées. Nous devons également faire mention de *P. gentilis*, non représenté ici, dont les plastes jaune verdâtre très clair, couvrent les faces valvaires en 2 rubans bien réguliers.

Cox a étudié largement le genre *Navicula*. Nous en avons choisi 4 types : *N. oblonga*, *N. radiosa*,

N. gregaria, *N. peregrina*. Toutes ces espèces se définissent bien à l'aide de leurs plastes collés sur les parois connectives. Ainsi, *N. oblonga* (Fig. 16), par ses dimensions et sa forme rappelle une *Pinnularia*, mais les plastes sont conformes aux critères définis par Cox; de plus, 2 sphères réfringentes auréolées sont toujours présentes de

Tabl. I. – Visibilité des caractères descriptifs en fonction du mode de préparation et de traitement des Diatomées. Symboles : caractères visibles : ●, caractères à visibilité incertaine : ○, caractères visibles sous certaines conditions : ⊙, Vivante : Vivt, Grillage : Gril, Dioxyde d'hydrogène : H₂O₂, Histologie : Hist.

Recognition of characters in the living state as a function of preparation mode and diatoms treatment. Visible characters : ●, obvious characters : ○, visible character under certain conditions : ⊙.

Niveaux descriptifs	Evolution des caractères	Préparations			
		Vivt	Gril	H ₂ O ₂	Hist
Cenobes					
Rubans plats		●	●		
Rubans cylindriques	Peuvent donner	●	●		
Rubans étoilés	des	●	●		
Etoilés	cellules	●	●		
Eventails-Couronnes	individuelles	●	●		
Faisceaux		●	●		
Quinquences-Z		●	●		
Fixées avec pédicelles	Convergence	●	⊙		○
Fixées avec coussinets	de	●			○
Fixées dans mucus	comportement	●			○
Diffusées dans mucus	intergenre	●			○
Tubes		●	⊙		○
Cellules individuelles					
Mobiles		●			
Immobiles		●			
Frustules					
Forme (valvaire, connective)		●	●	●	
Dimensions		●	●	●	
Stries (forme-nombre)		⊙	●	●	
Stauros	Variations	●	●	●	
Aera	des	●	●	●	
Ponctuation	caractères	●	●	●	
Raphé	bien	⊙	●	●	
Stigma	mesurés	●	●	●	
Fibules		⊙	●	●	
Pores		●	●	●	
Cloisons		⊙	●	●	
Chambres		●	●	●	
Fissures		●	●	●	
Epines-Soies		⊙	⊙	⊙	
Noyau					
Emplacement	relativ. fixe	⊙			●
Dimensions	Variables	⊙			●
Chromosomes	Fixes				●
Chloroplastes					
Emplacement	Variable	●			●
Nombre	"	●			●
Forme	"	●			●
Couleur	"	●			●
Pyrénoides					
Emplacement	Variables ?	⊙			●
Nombre	"	⊙			●
Dimensions	"	⊙			●
Chondriomes (mitochondries)					
Emplacement	Variable				●
Nombre	"				●
Dimensions	"				●
Dictyosomes (ap. de Golgi)	Variable				●
Sécrétions lipidiques					
Emplacement	Très variable	●			●
Nombre	"	●			●
Dimensions	"	●			●
Vacuoles					
Emplacement	Variable	○			○
Nombre	"	○			○
Dimensions	"	○			○

chaque côté du noyau. Cependant, dans *N. radiosa* (Fig. 17 à 20) nous constatons le passage par tous les stades intermédiaires allant du type normal à celui de la couverture des faces valvaires avec ou sans pyrénolide visible. Quant à *N. gregaria* (Fig. 21) Cox insiste sur le décalage symétrique longitudinal des lames plastidiales. Or, sur cette photo, nous observons tous les types possibles : plastes égaux, centrés, décentrés, avec 1, 2, 3 ou 4 pyrénolides. De cette courte comparaison nous pouvons déjà dégager une tendance : la grande variabilité des formes des plastes à l'intérieur de l'espèce, en désaccord avec Cox, bien que la reconnaissance du genre soit effective et se fasse assez facilement. Ce n'est pas toujours le cas et c'est pourquoi nous avons poursuivi nos investigations sur d'autres genres et espèces. Dans l'exemple de *Amphora ovalis*, nous avons recherché la variation de dimension pour vérifier la stabilité ou non de la forme des chloroplastes. Ainsi la figure 22 montre une Diatomée issue d'une cellule initiale avec des plastes couvrant la totalité de la valve, alors que sur les figures 23 et 24 ils prennent la forme en H incurvé avec 2 sphères réfringentes. Ensuite, nous avons comparé deux formes identiques mais de genres différents : *Caloneis amphisbaena* (Fig. 25, 26) avec *Anomoeoneis sphaerophora* (Fig. 27); dans les 2 premières la forme des plastes montre sa variabilité mais également celle du frustule. Quant à *A. Sphaerophora*, seule la couleur verdâtre peut nous faire soupçonner la différence de genre. En restant dans les Naviculacées nous avons comparé *Navicula peregrina* (Fig. 28) et *Stauroneis phoenicentron* (Fig. 29). Même silhouette mais plastes différents, cependant tous deux sont conformes aux définitions données par Cox. Toutefois, nous avons rencontré dans les 2 espèces des chloroplastes dont les formes étaient bien éloignées de ce modèle.

Avec *Gomphonema* nous avons essayé de voir s'il y avait une constante de forme des plastes à travers les espèces. Si *G. truncatum* (Fig. 30) montre bien la forme en H identique à *G. augur* (Fig. 31), *G. olivaceum* (Fig. 32) semble inorganisé et nous avons été contraint à une observation après grillage pour une détermination précise. *G. gracile* (Fig. 33) a en général des plastes plus jaunes, mais la forme valvaire est pratiquement identique à *Rhoicosphenia abbreviata* (Fig. 34). Seul l'examen des vues connectives permet la discrimination. *Gomphoneis minuta* (Fig. 35) est à rapprocher du genre *Gomphonema*, mais ses dimensions 2 fois plus grandes évitent la confusion.

Nous avons étudié plus complètement le genre *Cymbella* et 9 espèces ont été sélectionnées. Nous avons essayé de voir si dans une grande population d'individus de dimensions identiques nous pourrions trouver une constante. *C. inaequalis* (Fig. 36 à 41) nous a permis de constater qu'il n'en est rien. Depuis la forme en H incurvé

(Fig. 36) jusqu'au remplissage complet de la valve (Fig. 41) nous avons tous les intermédiaires. Egalement, certaines cellules n'ont aucune goutte lipidique (Fig. 39, 40, 41) alors que d'autres en sont remplies (Fig. 36, 37, 38). Seules deux constantes ont été remarquées : la forme en **Omega** de la partie dorsale du plaste et 2 sphères auréolées à chaque extrémité. Quant au pyrénolide il est parait-il dans l'**Omega** !

Avec *Cymbella triangulum* (Fig. 42 à 47) nous avons de nouveau recherché l'existence de constantes au cours de la réduction dimensionnelle. De même que pour *Amphora ovalis*, nous ne constatons aucune constante dans la forme générale des chloroplastes si ce n'est un **Pont** sombre sur le bord ventral qui apparaît à tous les stades de la vie végétative, depuis la cellule initiale (Fig. 42) jusqu'à la réduction maximale (Fig. 47).

Poursuivant notre enquête, nous avons comparé deux à deux 4 espèces de *Cymbella* : *C. cornuta* (Fig. 48), *C. aspera* (Fig. 49), d'une part, *C. cistula* (Fig. 50) et *C. cymbiformisme* (Fig. 51), d'autre part, dont les formes des frustules sont semblables. *C. cornuta* semble toujours posséder une bande médiane sombre alors que *C. aspera* n'en possède pas; de plus sur la photo cette cellule est remplie de gouttes lipidiques. Quant aux 2 autres, les appareils plastidiaux sont pratiquement identiques et ne permettent aucune différenciation. *Cymbella tumida* (Fig. 52) bien caractéristique par la forme du frustule pourrait néanmoins être rapprochée de *C. cistula* pour les chloroplastes. C'est une espèce aisément identifiable à l'état vivant. Les deux dernières espèces de *Cymbella* vivent dans des tubes et sont bien identifiables car tout les sépare : *C. caespitosa* (Fig. 53) est en général 2 fois plus petite que *C. prostrata* (Fig. 54, 55) et de plus celle-ci possède, outre sa forme plus trapue, des plastes brun foncé d'une manière constante.

Nous avons tenu à présenter 6 exemples de la grande famille des *Nitzschia* pour montrer l'impossibilité de s'appuyer sur les plastes pour la détermination. En effet, presque toutes les espèces ont pratiquement les mêmes chloroplastes formés de 2 lames situées de chaque côté du noyau et remplissant plus ou moins la cellule. La figure 56 montre *Nitzschia dubia* en vue connective et révèle la disposition des lames plastidiales de forme légèrement sigmoïde alors que *N. tryblionnella* (Fig. 57) est vu par la face valvaire. De même pour *N. debilis* (Fig. 58), mais dans cette espèce nous n'apercevons pas le noyau. Puis nous avons *N. filiformis* (Fig. 59) et *N. acicularis* (Fig. 60), dans ces 2 cas aucune information ne peut être tirée des chloroplastes. Par contre, *N. fruticosa* (Fig. 61) peut être déterminée immédiatement lorsqu'elle est observée en colonies étoilées.

Tabl. II. — Extrait des clés de détermination des Diatomées (Bourrelly 1968-1981) avec indication des caractères descriptifs reconnaissables sur le vivant (lettres grasses) et de la reconnaissance des genres (italiques grasses), visibilité des caractères incertaine (normales soulignées), genres incertains (italiques soulignées).

Abstract of diatoms identification keys (Bourrelly 1968, 1981) with indications of descriptive characters recognizable from living organisms and of the recognition of genera, visibility of uncertain characters, uncertain genera.

A. Valve de forme circulaire (vue en plan) en cours cylindre (vue de profil)		C. pas de cloison parallèle aux valves	
B. vue de profil avec sillon médian marqué	<i>Melosira</i>	D. Raphé tordu en S	<i>Amphiprora</i>
B. Vue de profil sans sillon marqué		E. Cellules à profil en forme de 8	<i>Scolioptera</i>
C. Valve à ornementation marginale différente de l'ornementation centrale		E. Cellules à profil non en forme de 8	
D. Vue en plan un canal raphéen à la marge de la valve	<i>Surirella</i>	F. Valve avec stries perpendiculaires à l'axe	<i>Gyrosigma</i>
E. Valve plane	<i>Campydiscus</i>	F. Valve avec deux séries de stries perpendiculaires et parallèles à l'axe	<i>Pleurosigma</i>
E. Valve tordue en selle	<i>Cyclotella</i>	F. Valve avec trois séries de stries se coupant à 60°	
D. Pas de canal raphéen		D. Raphé rectiligne	
C. Valve à champ médian non différent de la marge		E. Valves isopolaire	
D. Ornementation régulièrement méticuleuse	<i>Coscinodiscus</i>	F. Raphé encadré par deux lignes parallèles	<i>Amphipleura</i>
E. Valve parfaitement circulaire	<i>Biddulphia</i>	G. Ces lignes visibles seulement aux deux pôles	
E. Valve en citron avec deux pôles lisses	<i>Thalassiosira</i>	G. Ces lignes s'étendent tout au long du raphé	<i>Diploneis</i>
D. Des rayons lisses entre les rayons des pores	<i>Stephanodiscus</i>	H. Valves elliptiques	
E. Un ocellé marginal		H. Valves lanceolées	
E. Pas d'ocelle, des épines marginales courtes		I. Deux séries de stries se coupant à angle droit	<i>Frustulia</i>
A. Valve cylindrique allongée (en vue de profil) parfois un peu aplatie		J. Nodules apicaux courts	<i>Vanheurckia</i>
B. Un sillon au milieu de la cellule (vue de profil)	<i>Melosira</i>	J. Nodules apicaux allongés	<i>Breissonia</i>
B. Pas de sillon médian marqué		I. Un seul système de côtes ponctuées	
C. Deux épines à chaque pôle	<i>Attheya</i>	F. Raphé non encadré par deux lignes parallèles	<i>Neidium</i>
C. Une épine à chaque pôle	<i>Rhizosolenia</i>	G. Au centre les deux branches du raphé sont en crochets opposés	
A. Valve triangulaire ou étoilée (vue en plan)		G. Les branches du raphé non en crochets opposés	
B. Valve de grande taille, triangulaire ou étoilée à 6 pôles	<i>Hydrosera</i>	H. Des lignes marginales parallèles au bord de la valve	
B. Valve de petite taille triangulaire		I. Stries bien marquées ou côtes lisses	<i>Pinnularia</i>
C. Etoiles à trois bras grêles	<i>Centronella</i>	I. Stries fines parfois ponctuées	<i>Caloneis, Oestrupia</i>
C. Valve triangulaire	<i>Fragilaria, Nitzschia</i>	H. Pas de ligne marginale	
A. Valve à contour elliptique ou fusiforme (vue en plan) parfois cellule tordue en S ou en C		I. Aire centrale lisse sans croix ou en X atteignant le bord de la valve	<i>Stauroneis</i>
B. Valve sans raphé ni pseudo raphé	<i>Terpsinoe</i>	I. Aire centrale non en croix	<i>Anomoeonis</i>
C. Valve droite à bords ondulés	<i>Amphycampa</i>	J. Stries en tirets irréguliers	<i>Pinnularia</i>
C. Valve plus ou moins courbée en C		J. Stries lisses ou côtes	<i>Navicula</i>
B. Les deux valves possèdent un pseudo raphé axial		J. Stries ponctuées très fines	<i>Didymosphenia</i>
C. Un canal raphéen fait le tour de la valve	<i>Campylo-discus</i>	E. Valves hétéropolaires	
D. Valve tordue en forme de selle	<i>Cymatopleura</i>	F. Extrémité apicale du raphé en crochet	<i>Gomphonema</i>
D. Valve non en selle	<i>Stenoptero-bia</i>	F. Extrémité du raphé non en crochet marqué	<i>Gomphonema</i>
E. Surface valvaire ondulée (visible de profil)	<i>Surirella</i>	G. Des lignes marginales parallèles aux bords de la valve	<i>Gomphocymbella</i>
E. Surface valvaire non ondulée		G. Pas de ligne parallèle marginale	<i>Cymbella</i>
F. Cellule très allongée en forme de S	<i>Tretracvlus</i>	B. Valves avec canal raphéen présentant des pores	<i>Amphora</i>
F. Cellules non en forme de S	<i>Tabellaria</i>	C. Canal raphéen faisant le tour complet des valves	
C. Pas de canal raphéen marginal ni de nodule polaire		D. Valves circulaires creusées en selle vue de profil	<i>Campylo-discus</i>
D. Des cloisons perforées parallèles aux valves	<i>Diatoma</i>	D. Valves non incurvées en selle	<i>Stenoptero-bia</i>
E. Des côtes valvaires coupant les pseudo-raphé	<i>Meridion</i>	E. Valves étroites en S	
E. Pas de côte valvaire	<i>Asterionella</i>	E. Valves non en S	
D. Pas de cloison perforée	<i>Opephora</i>	F. Surface des valves ondulée régulièrement (visible en vue de profil)	<i>Cymatopleura</i>
E. Des côtes valvaires coupant des pseudo-raphé	<i>Fragilaria</i>	F. Surface des valves plane rarement tordue en spirale	<i>Surirella</i>
F. Valve isopolaire		C. Canal raphéen médian ou localisé sur un seul côté de la valve	
F. Valve hétéropolaire	<i>Synedra</i>	D. Valves auréolées avec de plus des côtes puissantes perpendiculaires à l'axe	<i>Denticula</i>
E. Pas de côte valvaire	<i>Ceratoneis</i>	E. Valves fusiforme régulières	<i>Epithemia</i>
F. Colonies en étoiles plates	<i>Eunotia</i>	E. Valves isopolaires en C ou hétéropolaires pyriformes	<i>Rhopalodia</i>
F. Cellules solitaires ou en colonies non étoilées	<i>Actinella</i>	F. Valves avec des cloisons perforées parallèles à la valve	
G. Valves hétéropolaires		F. Valves sans cloison	<i>Cylindrotheca</i>
G. Valves isopolaires	<i>Peroniopsis</i>	D. Pas de côte puissante, ornementation homogène	<i>Bacillaria</i>
H. Cellules droites non en C	<i>Rhoicosphenia</i>	E. Canal raphéen tordu en hélice	<i>Gomphonitzschia</i>
I. Colonies rubannées	<i>Pseudoperonia</i>	E. Canal raphéen non en hélice	<i>Cymbellonitzschia</i>
I. Colonies non rubannées ou cellules solitaires		F. Cellules en colonies rubannées	
H. Cellules recourbées en C	<i>Coconeis</i>	G. Valves hétéropolaires	
I. Aire centrale lisse symétrique	<i>Achnanthes</i>	G. Valves isopolaires	
I. Aire centrale lisse asymétrique		H. Valves en segment de cercle	
B. Valve avec un raphé réduit à une fente à chaque pôle, des nodules polaires nets et parfois un pseudo-raphé	<i>Mastogloia</i>	H. Valves non en segment	<i>Nitzschia</i>
C. Valve isopolaire recourbée en C	<i>Diatomella</i>	I. La coupe transversale de la cellule montre les raphés au sommet des 2 angles opposés	<i>Hantzschia</i>
C. Valve hétéropolaire recourbée en C		I. La coupe transversale montre les raphés au sommet de 2 angles consécutifs	
B. Une valve possède un vrai raphé médian, l'autre un pseudo-raphé			
C. Valves hétéropolaires			
D. Vue de profil droite			
D. Vue de profil coudé en angle obtus			
C. Valves isopolaires			
D. Raphé très court			
D. Raphé normal			
E. Vue de profil rectiligne			
E. vue de profil coudé à angle obtus			
B. Chaque valve possède un vrai raphé médian			
C. Des cloisons perforées parallèles à la valve			
D. Des cloisons portent de petites chambres marginales			
D. Cloisons sans chambre			

Dans les Monoraphidées, 2 espèces peuvent être distinguées à l'état vivant : il s'agit de *Cocconeis pediculus* (Fig. 62) et *C. placentula* (Fig. 63) et ceci uniquement par la forme du frustule et la bordure cingulaire pour cette dernière espèce.

Nous terminerons enfin cette revue par les Araphidées à plastes granulaires et là encore. C'est incontestablement leur silhouette et leur arrangement en colonies qui permettent une reconnaissance à l'état vivant. Ainsi en est-il de *Diatoma*

vulgaris (Fig. 1), *Gramatophora* sp. (Fig. 2), *Tabellaria flocculosa* (Fig. 53) et *Pleurosira leavis* (Fig. 4). Pour cette dernière l'arrangement en étoile des plastes se remarque immédiatement, bien que ce caractère n'apparaisse pas clairement sur la photo. Les plastes granulaires sont également présents chez *Melosira varians* (Fig. 64, 65, 66) et *M. nummuloides* (Fig. 67). Mais, comme chez les Raphidées, force nous est de constater la grande variabilité de forme des grains qui peuvent tapisser entièrement les parois sous forme de pièces de puzzle, comme chez *M. varians*, ainsi la distinction avec *M. nummuloides* se fait uniquement à l'aide de la forme et l'arrangement des frustules.

CONCLUSIONS

Cette courte revue nous indique plusieurs tendances :

a) les plastes sont en général de forme et de disposition inconstante dans les espèces et les genres.

b) quelques dispositions spécifiques : **Pont, Omega, Sphères auréolées**, peuvent dans certains cas amener jusqu'à l'espèce.

c) dans la grande majorité des cas, c'est la forme du frustule qui conduit au genre et quelquefois à l'espèce.

A titre d'exemple, à l'aide du Tabl. II qui reprend une partie des clés de détermination utilisées par Bourrelly (1968, 1981), nous montrons les limites de l'observation sur le vivant (*sensu stricto*) pour déterminer les genres et les espèces. Toutefois, en fonction de ce qui a été montré précédemment, ce tableau ne saurait en aucun cas servir de guide de reconnaissance des espèces. Car pour ce faire, il faudrait avant sa constitution, reprendre l'examen comparatif de la totalité des genres et des espèces.

Sur ce tableau, les caractères descriptifs sont en lettres grasses lorsqu'ils sont bien visibles sur le vivant par les moyens optiques classiques : forme générale, indentations, excroissances, etc. Les genres reconnus sont en italique gras. Il est remarquable que des caractères puissent être visibles mais ne conduisent pas à la détermination du genre. Ainsi : « cellules très allongées en forme de S », peut-être attribué à *Stenopterobia* ou à *Nitzschia sigmoïdea*. A contrario, des caractères peuvent être indistincts mais la Diatomée cependant identifiable. Tels que : « valve avec 2 séries de stries perpendiculaires et parallèles à l'axe » ainsi que « valve avec 3 séries de stries se coupant à 60° » qui sont dans les 2 cas parfaitement invisibles à l'état vivant. Cependant, à l'aide de la forme générale on peut facilement reconnaître :

Gyrosigma et *Pleurosigma* mais sans distinction des genres. Ainsi la détermination précise sur le vivant n'est pas réaliste en fonction des exigences de la taxonomie actuelle. Par contre, s'il s'agit d'une aide rapide à la détermination générique, cela pourrait être envisagé mais demanderait de longues études comparatives par genre et par espèce à tous les stades de la vie végétative telles que les a commencées Cox (1984) sans être certain d'aboutir. Toutefois, une connaissance des espèces et des genres pourrait être acquise si nous envisagions systématiquement l'étude et la description des éléments cellulaires de chaque espèce découverte comme l'ont réalisé Bertrand & Coste (1994) pour *Cymbella triangulum* et Franz & Schmid (1994) pour *Biddulphiopsis titiana*.

REMERCIEMENTS – L'auteur remercie particulièrement l'Association des Diatomistes de Langue Française sans laquelle cette publication n'aurait pas été possible, ainsi que les lecteurs qui ont bien voulu faire d'utiles suggestions.

BIBLIOGRAPHIE

- AGARDH C.A., 1816. *Synopsis algarum Scandinavia. Adjecta dispositione universalis algarum*. 135 p. Lundae.
- AGARDH C.A., 1824. *Systhema algarum*. Literis Berlingianis. p. 1-312. Lundae.
- AGARDH C.A., 1830. *Conspectus criticus diatomacearum*. t. II p. 17-38. Lundae.
- BERTRAND J. & M. COSTE, 1994. *Cymbella triangulum* (Ehr.) Cleve. (Bacillariophyceae). Un taxon nouveau pour la flore européenne. Caractéristiques morphologiques et écologiques. *Cryptogamie, Algol.* **15** (2) : 147-158.
- BOURRELLY P., 1968-1981. Les algues d'eau douce. Initiation à la systématique. Tome II; Les algues jaunes et brunes. Ed. Boubée, Paris, 517 p.
- COX E.J., 1981. The use of chloroplasts and other features of living cell in the taxonomy of naviculoid diatoms. In Ross (Ed.) Proc. 6th Diatom Symp. Budapest, Sept. 80-O. Koeltz pub. Koenigstein : 115-133.
- COX E.J., 1984. Some taxonomical and ecological consideration of morphological variation within natural population of benthic diatoms. In Ricard (ed), Paris Aug. 84. O. Proc. 8th internat. Diatom Symp Koeltz, pub. Koenigstein : 163-172.
- FRANZ S.M. & A.M. SCHMID, 1994. Cell-cycle and phenotypes of *Biddulphiopsis titiana* in culture. *Diatom Research*, **9** (2) : 265-288.
- GREVILLE R.K., 1823-1828. *Scotisch Cryptogamic Flora* – 6 vol. Maclachlan & Stewart, Edinburg & London.
- KUTZING F.T., 1833. *Synopsis Diatomacearum*. *Linnaea* **8** : 529-620, taf. 13-19.

KUTZING F.T., 1844. Die Kieselschaligen Bacillarien oder Diatomeen. Nordhausen, 152 p. 30 taf.

KUTZING F.T., 1849. Species algarum F.A. Brocklaus, Leipzig, p. 1-922.

MERESCHKOWSKY C., 1902-1903. Les types de l'endochrome chez les diatomées. *Scripta Botanica* **21** : 1-194.

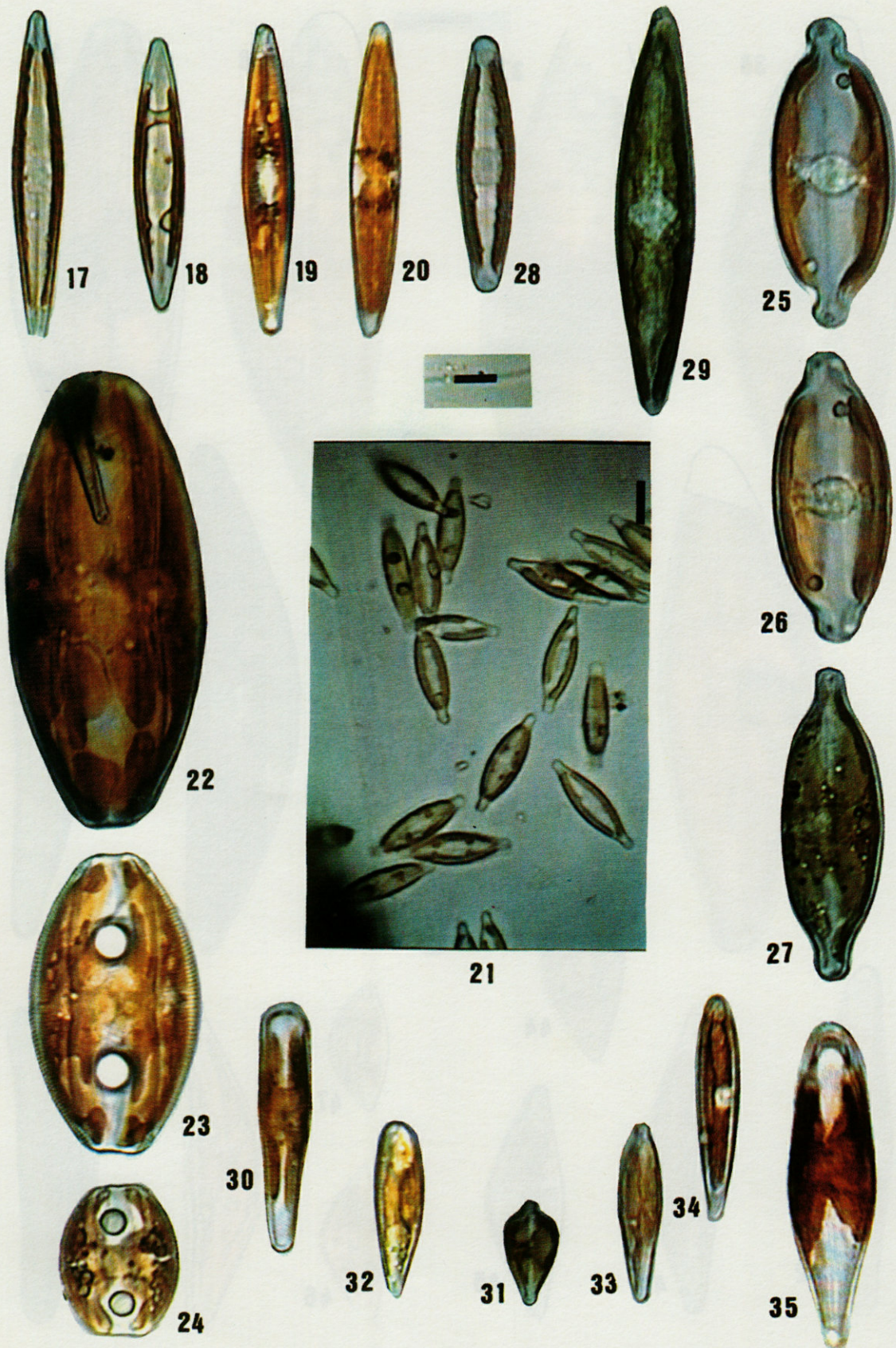
SMITH W., 1853. A Synopsis of British Diatomaceae. Vol. 1 – John van Voorst, London 1-89. Taf. 1-31.

SMITH W., 1856. A Synopsis of British Diatomaceae. Vol. 2. John van Voorst, London, 1-107. Taf. 32-60.

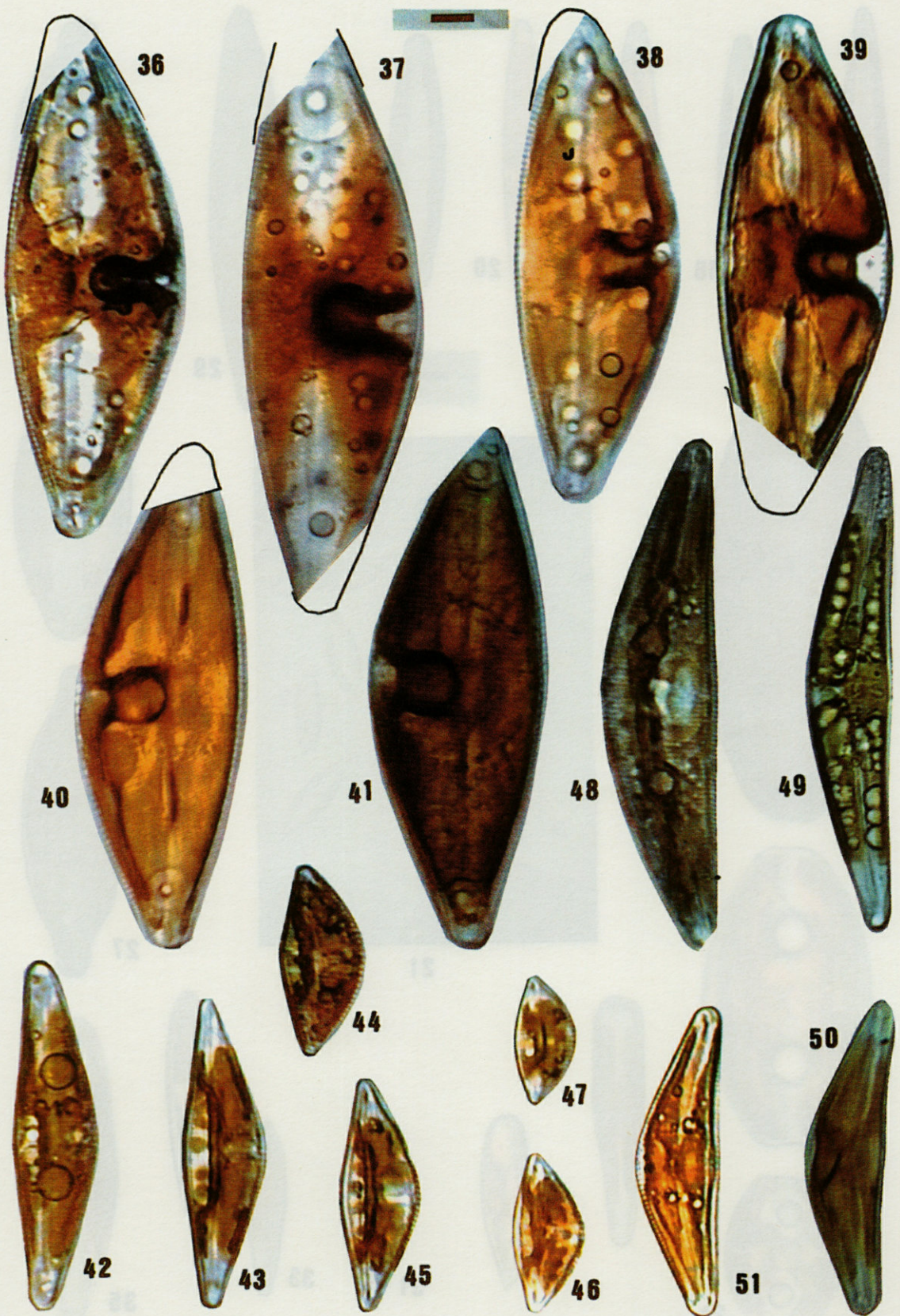
Reçu le 26 octobre 1994; received October 26, 1994
Accepté le 13 décembre 1994; accepted December 13, 1994



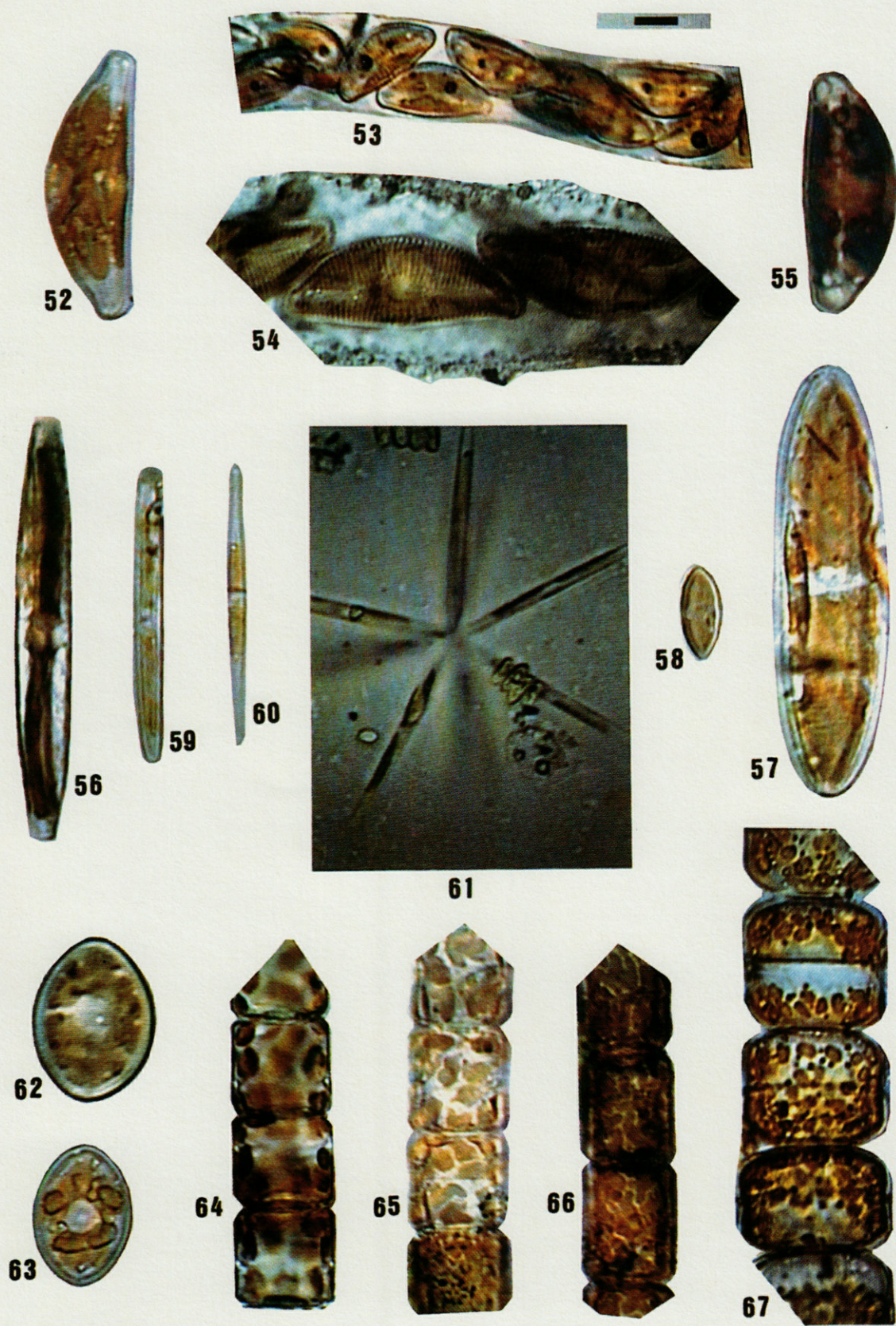
Pl. I. — Fig. 1 à 16. 1 : *Diatoma vulgare* Bory; 2 : *Grammatophora serpentina* Ehr.; 3 : *Tabellaria flocculosa* (Roth) Kütz.; 4 : *Pleurosira laevis* (Ehr.) Compere; 5-6 : *Gyrosigma acuminatum* (Kütz.) Rab.; 7 : *Gyrosigma attenuatum* (Kütz.) Rab.; 8 : *Gyrosigma balticum* (Kütz.) Rab.; 9 : *Pleurosigma angulatum* Quekett; 10 : *Pleurosigma salinarum* Grunow; 11 : *Pinnularia neamajor* Krammer; 12 : *Pinnularia viridis* (Nitz.) Ehr.; 13-14 *Pinnularia nodosa* Ehr.; 15 : *Pinnularia acrosphaeria* Rab.; 16 : *Navicula oblonga* Kütz.



Pl. II. — Fig. 17 à 35. 17-18-19-20 : *Navicula radiosa* Kütz.; 21 : *Navicula gregaria* Donkin; 22-23-24 : *Amphora ovalis* (Kütz.) Kütz. 25-26 : *Caloneis amphisbaena* (Bori.) Cleve; 27 : *Anomoeoneis sphaerophora* (Ehr.) Kütz.; 29 : *Stauroneis phoenicentron* (Nitz.) Ehr.; 30 : *Gomphonema truncatum* Ehr.; 31 : *Gomphonema augur* Ehr.; 32 : *Gomphonema olivaceum* (Horn.) Brebisson; 33 : *Gomphonema gracile* Ehr., 34 : *Rhoicosphenia abbreviata* (Agardh) Lange-Bertalot; 35 : *Gomphoneis minuta* Cleve.



Pl. III. — Fig. 36 à 51. 36 à 41 : *Cymbella inaequalis* (Ehr.) Rab.; 42-47 : *Cymbella triangulum* (Ehr.) Cleve; 48 : *Cymbella cornuta* (Ehr.) Ross; 49 : *Cymbella aspera* (Ehr.) Cleve; 50 : *Cymbella cistula* (Ehr.) Kirch; 51 : *Cymbella cymbiformis* Agardh.



Pl. IV. — Fig. 52 à 67. 52 : *Cymbella tumida* (Breb.) v. Heurck; 53 : *Cymbella caespitosa* (Kütz.) Brun; 54-55 : *Cymbella prostrata* (Berk.) Cleve; 56 : *Nitzschia dubia* W. Smith; 57 : *Nitzschia tryblionella* Hantzsch; 58 : *Nitzschia debilis* Arnott; 59 : *Nitzschia filiformis* (W. Smith) v. Heurck; 60 : *Nitzschia acicularis* (Kütz.) W. Smith; 61 : *Nitzschia fruticosa* Hustedt; 62 : *Cocconeis pediculus* Ehr.; 63 : *Cocconeis placentula* Ehr.; 64-66 : *Melosira varians* Agardh; 67 : *Melosira nummuloides* (Dillwyn) Agardh.

DIATOMÉES DE QUELQUES ÉCOULEMENTS SAUMÂTRES DE LORRAINE

Diatoms from brackish flowing waters from Lorraine (France)

J.-F. PIERRE

*Hydrobiologie-algologie, Centre de 1^{er} Cycle, Université Henri-Poincaré-Nancy I,
BP 239, 54506 Vandœuvre cedex, France*

DIATOMÉES
SALINITÉ
MILIEUX CONTINENTAUX
LORRAINE

RÉSUMÉ – La présence d'Algues marines dans les formations continentales salées de la Région lorraine (France) est signalée dès 1843 par Godron. Le présent travail concerne plusieurs milieux d'écoulement dans la vallée de la Seille caractérisés par une salinité modérée et variable. Un important cortège d'espèces diatomiques inféodées au sel et connues des milieux côtiers maritimes ou des salines est rencontré dans les stations étudiées. Ce premier travail, appuyé d'investigations en cours, confirme déjà l'originalité floristique et la pérennité de la flore diatomique de ces milieux salés et justifie l'intérêt d'une mesure conservatoire pour plusieurs zones de la vallée de la Seille.

DIATOMS
SALT WATER
INLAND WATER
LORRAINE

ABSTRACT – The presence of brackish or marine algae in salt waters from Lorraine (France) has been known since 1843 (Godron). The present paper concerns some flowing waters of the Seille valley characterized by moderate and variable mineral content related to the salt layer of the Keuper formation. In these localities many euryhaline, brackish or marine diatoms are found and indicate the perennity and specificity of diatom flora. The present survey later completed by results concerning diatoms from marshes with high saline content is of use to justify the protection of these areas.

INTRODUCTION

Le vaste gisement salifère lorrain ainsi que l'usage qui en est fait sont à l'origine de contaminations naturelles ou anthropiques des milieux récepteurs par des apports salés plus ou moins concentrés. Deux régions en Lorraine sont particulièrement concernées, la vallée de la Seille et, dans une moindre mesure, les vallées du Sânon et de la Moyenne-Meurthe; dès 1843, Godron y signalait la présence d'Algues marines.

Cette particularité régionale, avec peu d'équivalents mondiaux, se manifestait par la présence d'Algues connues seulement des régions maritimes, dans une très grande variété de biotopes ayant en commun une teneur en sel, sous forme de chlorure de sodium, les classant parmi les milieux saumâtres à salés, voire sursalés. Dans un contexte continental, ces biotopes peuvent correspondre à des structures très diverses par leurs caractères géomorphologiques, physiques, chimiques et hydrobiologiques.

Le présent travail rend compte du peuplement diatomique de plusieurs milieux d'eaux courantes soumis à des apports salés, localisés dans la vallée de la Seille entre Dieuze et Château-Salins (Fig. 1).

Une sélection hétérogène d'écoulements saumâtres dans cette région de la Haute-Seille a été effectuée. Ont été retenus des milieux échappant au maximum à la pression anthropique, et pouvant faire l'objet d'un programme de protection (AC-NAT, Action Communautaire pour la Nature Près Salés, 1993-1995).

Il s'agit de zones rurales où les apports sont essentiellement d'origine naturelle: ce sont des remontées d'eaux salées plus ou moins saturées qui viennent sourdre au flanc ou dans le fond des vallées. Le mélange de cette saumure profonde avec les eaux superficielles est à l'origine de sources et d'écoulements de salure variable, qui peuvent plus ou moins stériliser les terrains avoisinants en permettant l'expression d'une flore halophile caractéristique, phanérogamique aisément observable (Hayon 1968) mais également algale (Pierre 1966).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les stations retenues sont les suivantes (Fig. 1) :

— **Source de Juvélize** (SOU), localisée parcelle 91 sur le ban de la commune de Juvélize. il s'agit d'un fossé bordé par une abondante végétation herbacée-arbustive couvrant largement le fond sur lequel circule lentement une mince lame d'eau, sans formation algale macroscopique visible.

— **Ancien canal des salines** (CAN), parcelle 92, commune de Juvélize. Le fond de cet ancien canal de flottage est recouvert d'une vase noirâtre de décomposition, extrêmement fine, agglomérée en surface par des enchevêtrements denses de filaments de *Microcoleus chthonoplastes* Thur. ex Gom. et de *Lyngbya confervoides* Ag. ex Gom.. La partie la plus âgée de ces amas de Cyanophycées subit une biodégradation, semblable à celle que nous avons décrite dans le cas d'*Enteromorpha salina* Kütz. (Pierre et al. 1974).

— **Fossé de Basse-Recourt** (B-R), à la sortie ouest de Lezey, en limite du pré longeant au nord la route départementale 955. Sur la vase fine et noirâtre du fond prospèrent des Algues filamenteuses en coussins: *Enteromorpha intestinalis* (L.) Greville, *E. percurva* (Ag.) Ag., *E. salina* Kütz., *Rhizoclonium hieroglyphicum* (Ag.) Kütz. ssp. *riparium* (Harvey) Stockm., avec plus rarement *Lyngbya aestuarii* Liebman ex Gom. et *Anabaena cf. felisii* Born & Flash.

— **Fossé-mare du Pré Léo** (LEO), un kilomètre à l'est de Vic-sur-Seille. Dans ce pré en pente, une résurgence est à l'origine d'une succession de petites mares reliées entre elles, sans manifestation d'Algues macroscopiques.

— **Vieille-Seille** (V-S), au droit du Pré Léo. Sur la rive argileuse abrupte de ce bras de la Seille se développent quelques placages à base de Cyanophycées *Oscillatoria princeps* Vaucher et *O. sancta* Kütz. ex Gom..

Lorsque les conditions le permettaient, le prélèvement (24 juin 1993) a été réalisé au filet à plancton emmanché, sinon un raclage de la partie superficielle du fond l'a remplacé. Après étude du matériel à l'état frais, les Diatomées ont été préparées pour l'examen microscopique selon les techniques habituelles (peroxyde d'hydrogène et résine Naphrax).

Des analyses physico-chimiques prévues simultanément n'ayant pu être effectuées, le niveau actuel de salinité des stations n'est pas connu mais il peut être procédé à une estimation à partir de travaux antérieurs. Dagot (1962) relève dans la Seille des teneurs en sel sous forme de NaCl comprises entre 0,3 et 2,7 g.l⁻¹ avec des variations du simple au double selon la saison (été-automne). Patou (1962) relève des teneurs supérieures à 20 g.l⁻¹ dans la Vieille Seille à l'entrée de Moyenvic, de 8 à 38 g.l⁻¹ dans des rigoles d'écoulement, à Marsal ou dans des prés de la rive droite au niveau de St-Médard.

En conclusion, le niveau de salinité apparaît extrêmement variable, non seulement d'un milieu à un autre, mais également d'un jour à l'autre par suite de la sensibilité aux précipitations. Comment le peuplement diatomique va-t-il intégrer cette variabilité ?

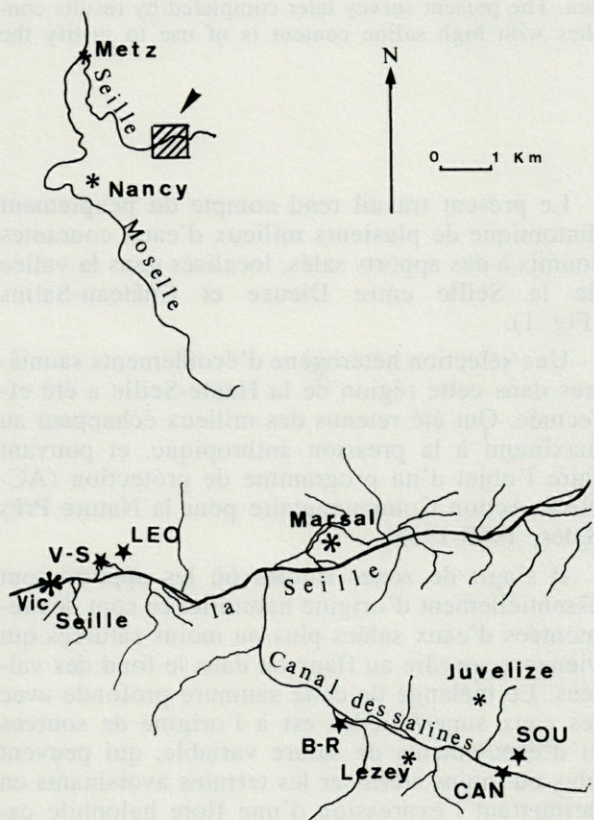


Fig. 1. — Carte de la vallée de la Seille.
Map of the Seille valley.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La richesse taxonomique apparaît très différente selon les stations, avec seulement 24 taxons pour le prélèvement dans l'ancien canal des salines, des valeurs proches : 50, 50 et 44 respectivement pour les relevés de la source de Juvélize, du Pré Léo et du fossé de Basse-Recourt, la Vieille-Seille étant plus riche avec 74 taxons (Tabl. I). Ces valeurs sont conformes aux résultats observés dans de nombreuses stations régionales de toute nature ayant fait l'objet du même type de prélèvement.

Dans les prélèvements de la vallée de la Seille, le peuplement diatomique est caractérisé par deux ou trois espèces dominantes ou communes qui changent d'une station à l'autre :

— *Navicula cincta* et *Nitzschia acuminata* pour le canal des salines,

— *Achnanthes minutissima* et *Cocconeis placentula* dans la source de Juvélize,

— *Nitzschia constricta*, *N. compressa*, *Navicula trivialis* pour le Pré Léo,

Tabl. I. - Liste des Diatomées. 0 : absence; 1 à 5 : rare à dominante.

List of diatoms. 0 : lack; 1 to 5 : rare to dominant.

IDENTIFICATION	CAN	SOU	LEO	B-R	V-S	IDENTIFICATION	CAN	SOU	LEO	B-R	V-S
ACHNANTHES						GYROSIGMA					
brevipes Ag.	0	0	1	0	0	acuminatum (Kütz.) Rabh.	0	1	0	0	0
v. intermedia (Kütz.) Cleve	1	0	1	2	1	attenuatum (Kütz.) Rabh.	0	0	1	0	0
v. islandica (Oest.) Kram. & L.-B.	0	0	0	1	1	nodiferum (Grun.) Reimer	1	2	0	0	0
lanceolata (Bréb.) Grun.	0	2	0	0	0	spencerii (W. Smith) Cleve	1	0	2	3	1
v. elliptica Cleve	0	1	0	0	0						
minutissima Kütz.	0	4	0	0	0	HANTZSCHIA					
AMPHORA						amphioxys (Ehr.) Grun.	1	1	1	1	1
coffaeiformis (Ag.) Kütz.	0	0	3	3	0	vivax (W. Smith) M. Peragallo	1	0	0	0	1
commutata Grun.	0	0	0	1	1						
holistica Hustedt	0	0	0	0	2	MELOSIRA					
lybica Ehr.	0	1	1	0	1	varians Ag.	0	1	0	0	1
normanii Rabh.	0	1	0	0	0						
ovalis (Kütz.) Kütz.	0	0	1	1	0	NAVICULA					
pediculus (Kütz.) Grun.	0	1	0	0	0	capitata Ehr.	0	1	0	0	1
ANOMONEIS						cincta (Ehr.) Ralfs	5	0	1	0	1
sphaerophora (Ehr.) Pfitzer	0	1	0	0	1	crucicula (W. Smith) Donkin	0	0	2	2	2
fo. costata (Kütz.) Schmidt	0	0	0	0	1	v. cruciculoides (Brockmann) Lange-Bert.	0	0	1	0	0
fo. sculpta Krammer	0	0	0	0	2	cryptocephala Kütz.	0	1	0	0	0
AULACOSEIRA						cuspidata (Kütz.) Kütz. v. ambigua (Ehr.) C1	0	0	0	0	1
granulata (Ehr.) Simonsen	0	0	0	0	1	v. curta fo. rostrata Germain	0	0	0	0	1
italica (Ehr.) Simonsen	0	0	1	0	0	digitoradiata (Greg.) Ralfs	1	0	0	1	0
muzzanensis (Meister) Krammer	0	0	0	0	1	lanceolata (Ag.) Ehr.	0	1	1	0	0
BACILLARIA						mutica Kütz.	0	0	1	0	0
paradoxa Gmelin	0	0	0	0	3	oblonga Kütz.	0	0	0	1	1
CALONEIS						peregrina (Ehr.) Kütz.	0	0	0	1	1
amphisbaena (Bory) Cleve	0	0	1	1	1	placentula (Ehr.) Grun.	0	0	0	1	1
v. subsalina (Donkin) Cleve	0	0	1	0	0	pusilla W. Smith	1	0	0	0	1
bacillum (Grun.) Cleve	0	0	1	0	0	pygmaea Kütz.	1	0	2	1	1
westii (W. Smith) Hendey	0	0	0	0	1	radiosa Kütz.	0	2	0	0	1
CAMPYLODISCUS						rhynchocephala Kütz.	0	0	0	1	0
noricus Ehr.	0	1	0	0	0	salinarum Grun.	2	0	3	0	3
COCONEIS						slesvicensis Grun.	0	1	1	0	0
pediculus Ehr.	1	0	0	0	1	spicula (Hickie) Cleve	0	0	1	1	5
placentula Ehr.	0	3	1	1	1	trivialis Lange-Bertalot	0	0	3	0	0
CYCLOTELLA						viridula (Kütz.) Ehr.	0	0	0	1	1
meneghiniana Kütz.	0	0	1	0	1	v. rostellata (Kütz.) Cleve	0	0	0	1	0
radiosa (Grun.) Lemmerman	0	0	1	0	0	NEIDIUM					
CYMATOPLEURA						dubium	0	0	0	1	0
solea (Bréb.) W. Smith	0	0	0	0	1	NITZSCHIA					
CYMBELLA						acuminata (W. Smith) Grun.	3	0	2	1	2
aspera (Ehr.) Cleve	0	1	0	0	0	amphibia Grun.	0	0	1	0	1
caespitosa (Kütz.) Brun	0	0	1	0	0	closterium (Ehr.) W. Smith	0	0	1	0	0
cymbiformis Ag. v. nonpunctata Fontell	0	1	0	0	0	compressa (Bailey) Boyer	0	0	3	3	1
ehrenbergii Kütz.	0	0	0	0	1	constricta (Greg.) Grun.	0	1	4	1	1
leptoceros (Ehr.) Kütz.	0	0	0	0	1	dubia (W. Smith)	2	1	0	0	0
naviculiformis Auerswald	0	1	0	0	0	hungarica Grun.	1	1	0	1	1
prostrata (Berkeley) Cleve	0	0	0	0	1	linearis (Ag.) W. Smith.	0	2	0	1	0
DIATOMA						littoralis Grun.	0	1	0	0	0
moniliformis Kütz.	1	0	1	0	0	recta Hantzsch	0	1	0	1	0
tenuis Ag.	0	1	0	0	0	scalpelliformis Grun.	1	0	1	1	1
vulgaris Bory	0	0	0	1	1	sigma (Kütz.) W. Smith	0	0	1	0	0
DIPLONEIS						sigmoidea (Nitzsch) W. Smith	1	1	0	0	1
elliptica (Kütz.) Cleve	0	1	0	0	1	tryblionella Hantzsch	0	0	0	0	1
interrupta (Kütz.) Cleve	1	1	1	1	1	vermicularis (Kütz.) Hantzsch	0	1	0	1	0
parma Cleve	0	1	0	0	0	vitrea Norman	1	0	0	0	0
ENTOMONEIS						v. salinarum Grun.	2	0	0	0	0
alata (Ehr.) Ehr.	0	1	0	0	0	PINNULARIA					
EPITHEMIA						lundii Hustedt	0	0	0	0	1
adnata (Kütz.) Bréb.	0	0	1	0	1	microstauron (Ehr.) Cleve	0	0	0	1	1
sorex Kütz.	0	0	1	0	1	viridis (Nitzsch) Ehr.	0	0	0	0	1
turgida (Ehr.) Kütz.	0	0	0	0	1	PLAGIOTROPIS					
FRAGILARIA						lepidoptera (Pfitzer) Cleve	0	0	0	0	2
capucina Desmaz. v. gracilis (Oestrup) Hust.	0	1	0	0	0	PLEUROSIGMA					
v. vaucheriae (Kütz.) Lange-Bert.	0	1	0	0	0	angulatum Quekett	0	0	0	0	1
dilatata (Bréb.) Lange-Bert.	0	0	0	0	1	salinarum Grun.	0	0	0	2	0
fasciculata (Ag.) Lange-Bert.	0	0	0	3	3	RHOICOSPHENIA					
pulchella (Ralfs) Lange-Bert.	0	1	0	3	1	abbreviata (Ag.) Lange-Bert.	1	1	1	1	1
ulina (Nitzsch) Lange-Bert.	0	1	1	1	1	RHOPALODIA					
v. acus (Kütz.) Lange-Bert.	0	1	0	0	0	brebissonii Krammer	0	0	0	0	1
GOMPHONEMA						constricta (W. Smith) Krammer	0	0	1	1	0
angustatum (Kütz.) Rabh.	0	1	0	0	1	gibba (Ehr.) O. Müller	0	1	0	1	1
clavatum Ehr.	0	1	0	1	0	gibberula (Ehr.) O. Müller	0	0	1	0	0
parvulum (Kütz.) Kütz.	0	1	0	0	0	musculus (Kütz.) O. Müller	0	0	1	2	0
truncatum Ehr.	0	0	0	0	1	STAURONEIS					
GYROSIGMA						anceps Ehr.	1	0	1	1	1
acuminatum (Kütz.) Rabh.	0	1	0	0	0	phoenicenteron (Nitzsch) Ehr.	1	0	1	1	1
attenuatum (Kütz.) Rabh.	0	0	1	0	0	STEPHANODISCUS					
nodiferum (Grun.) Reimer	1	2	0	0	0	hantzschii Grun.	0	0	1	0	0
spencerii (W. Smith) Cleve	1	0	2	3	1	SURIRELLA					
HANTZSCHIA						brebissonii Krammer & Lange-Bert.	0	1	1	1	1
amphioxys (Ehr.) Grun.	1	1	1	1	1	brightwellii W. Smith	0	1	0	0	0
vivax (W. Smith) M. Peragallo	1	0	0	0	1	minuta Bréb.	0	0	0	0	1
MELOSIRA						ovalis Bréb.	0	1	1	0	0
varians Ag.	0	1	0	0	1	patella Kütz.	0	1	0	0	0
						spiralis Kütz.	0	1	0	0	0
						striatula Turpin	0	0	1	1	2
						subsalsa W. Smith	2	0	1	1	0

– *Navicula spicula*, et dans une moindre mesure *N. salinarum*, *Fragilaria fasciculata* et *Bacillaria paradoxa* caractérisent la Vieille-Seille.

– le fossé de Basse-Récourt offre un aspect différent avec cinq espèces se partageant la dominance : *Amphora coffeaeformis*, *Fragilaria fasciculata*, *F. pulchella*, *Gyrosigma spencerii* et *Nitzschia compressa*.

La présence de ces Diatomées rend bien compte du caractère particulier de ces stations de salinité variable et habituellement plutôt basse : il y a un mélange entre des espèces à caractère halophile affirmé, rarement ou pas signalées ailleurs dans la région (*Nitzschia compressa*, *Navicula spicula*, *N. salinarum*) et des espèces répandues dans les eaux douces ou faiblement minéralisées (*A. minutissima*, *Cocconeis placentula*, *Navicula trivialis* etc.).

Si l'on considère l'ensemble des espèces recensées, l'influence du facteur salinité se dégage nettement, même si les Diatomées les plus caractéristiques de l'halophilie ne sont souvent qu'en petit nombre d'individus. Répondent plus particulièrement à ce critère les espèces suivantes : *Achnanthes brevipes*, *Amphora coffeaeformis*, *A. commutata*, *Anomoeoneis sphaerophora* et var., *Bacillaria paradoxa*, *Caloneis amphibia* v. *subsalina*, *C. westii*, *Diploneis interrupta*, *Entomoneis alata*, *Fragilaria fasciculata*, *F. pulchella*, *Hantzschia vivax*, *Navicula crucicula*, *N. digitoradiata*, *N. peregrina*, *N. salinarum*, *N. spicula*, *Nitzschia closterium*, *N. compressa*, *N. dubia*, *N. littoralis*, *N. scalpelliformis*, *N. vitrea* et v. *salinarum*, *Pinnularia lundii*, *Pleurosigma angulatum*, *P. salinarum*, *Rhopalodia constricta*, *R. musculus*, *Surirella brightwellii*, *S. striatula*, *S. subsalsa*.

Cependant la distribution de ces espèces dans les stations étudiées apparaît aléatoire ; elle peut être limitée à une seule des stations ou à quelques unes, être ici dominante et rare ou absente ailleurs. La relation au sel n'est d'ailleurs pas absolue, beaucoup des espèces citées étant connue d'autres milieux régionaux peu ou pas minéralisés et non ou très peu salins.

Dans les milieux prospectés sont également présentes des espèces non liées à la salinité mais capables de s'en accommoder et pouvant être accidentelles dans une station, comme par exemple *Aulacoseira muzzanensis*, qualifiée de nordique-alpine ! Il n'est pas possible non plus de préciser les facteurs expliquant la présence d'espèces telles que *Campylodiscus noricus* ou de *Surirella spiralis*, qui peuvent être considérées comme des curiosités dans ces lieux.

La flore diatomique de la Vieille-Seille est nettement plus diversifiée que celle des autres stations prospectées, y compris les marais (résultats à paraître). Il s'agit vraisemblablement d'une

convergence d'effets tels que l'alternance de dilutions-concentrations mais avec un effet tampon dû au débit du cours d'eau et l'enrichissement par drainage des sites riverains. Cela pourrait également expliquer la présence de Diatomées rarement signalées, notamment *Plagiotropis (Tropidoneis) lepidoptera*, assez commune dans cette station. Il s'agit, pour cette Diatomée très caractéristique, de l'unique station de référence dans cette région, où elle n'est d'ailleurs pas signalée par les auteurs antérieurs. Elle ne figure ni dans l'édition de la « Süßwasserflora » de Hustedt (1976), ni dans celle de Krammer & Lange-Bertalot (1986-1991). Par contre, Germain (1981) signale cette espèce, parfois en abondance, en eau saumâtre mais également en eau douce.

Parmi ces espèces non encore signalées dans ces milieux figure *Nitzschia dippei*, avec pour unique localisation actuelle l'ancien canal de flot-tage des salines.

Une autre de ces Diatomées caractéristiques est *Diploneis interrupta*, définie comme cosmopolite d'eau salée. Lemaire (1894) la signale, sous le nom de *Navicula interrupta* Kütz., près des salines de Lezey, approximativement entre nos stations « SOU » et « CAN ». Si Brunotte (1896) souligne la rareté de cette trouvaille en Lorraine, Roesch (1927) la mentionne dans la saline de Salzborn près de Sarralbe (Moselle). Plus récemment, Dagnet (1962) et Patou (1962) trouvent *D. interrupta* dans diverses stations (marais, fossés, cours ancien de la Seille), mais elle paraît cantonnée au cours supérieur, car Roussard (1965) ne la mentionne pas dans le cours moyen et inférieur de la rivière.

CONCLUSION

L'étude de ces quelques milieux, caractérisés par une salinité variable, révèle un peuplement diatomique diversifié avec un mélange d'espèces typiquement d'eaux douces et d'espèces qualifiées d'halophiles, jusqu'à des formes marines. Toutes ces Diatomées coexistent et si l'on ne peut affirmer que toutes sont physiologiquement actives, l'examen du matériel frais n'a pas mis en évidence de signes observables de dégradation du contenu cellulaire. Les variations de salinité ne semblent pas de nature à limiter le développement des Diatomées, tout en favorisant la présence d'espèces inféodées au sel.

La spécificité de la flore diatomique dans des écoulements plus ou moins salés de la vallée de la Seille a été soulignée par les anciens auteurs. Cette florule halophile est-elle constante dans le temps ? La comparaison est difficile car Lemaire, Peragallo ou Roesch n'ont pas donné de figures

et les équivalences taxonomiques sont parfois hasardeuses. De plus, la localisation exacte des stations de prélèvements, les dates et le nombre de visites ne sont pas précisés. Nos résultats restent encore très fragmentaires, mais permettent cependant de conclure à une pérennité des Diatomées caractéristiques de ces milieux halophiles continentaux. L'étude entreprise de prélèvements réalisés en zones marécageuses est de nature à compléter l'inventaire de ces Diatomées des milieux salés de Lorraine et de contribuer, en confortant cette spécificité sans équivalence nationale, au classement de ces espaces en zones protégées.

REMERCIEMENTS – Nous sommes redevable au Conservatoire des Sites Lorrains et au Parc Naturel Régional de Lorraine qui ont initié ce travail dans le cadre du projet ACNAT-Prés salés.

BIBLIOGRAPHIE

- BRUNOTTE C., 1896. Les marais salés de la vallée de la Seille. Berger-Levrault & Cie Imp., Nancy, 24 p.
- DAGOT M., 1962. Etude de la flore algale de la Seille de l'étang de Lindre à Moyenvic. D.E.S. Fac. Sci., Nancy, 35 p.
- GERMAIN H., 1981. Flore des Diatomées. Boubée Ed., Paris.
- GODRON D.A., 1843. Catalogue des Plantes cellulaires du département de la Meurthe. Nancy, 40 p.
- HAYON J.C., 1968. Recherches phytoécologiques sur les marais salés de Lorraine. Thèse Fac. Sc. Nancy, 212 p.
- HUSTEDT F., 1976. Die Süßwasser-Flora Mitteleuropas, Heft 10 : Bacillariophyta. O. Koeltz Sc. Pub., Koenigstein.
- KRAMMER K. & H. LANGE-BERTALOT, 1986-1991. Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2 : Bacillariophyceae. G. Fischer Verl., Jean.
- LEMAIRE A., 1894. Les Diatomées des eaux salées de Lorraine. *Le Diatomiste* 2, 7, 19 : 133-139.
- PATOU C., 1962. Etude de la flore algale de quelques marais salés de Lorraine. D.E.S. Fac. Sci., Nancy, 44 p.
- PERAGALLO M., 1923. Les Diatomées saumâtres des salines de Chambrey (Lorraine). *Bull. Ass. Philom. Alsace-Lorr.* 6 (5) : 247-255.
- PIERRE J.F., 1966. Deux siècles de recherches sur la systématique et l'écologie des Algues de Lorraine. *Bull. Acad. Soc. Lorr. Sc.* 6 (2) : 127-134.
- PIERRE J.F., G. KILBERTUS, O. REISINGER, 1974. Observations ultrastructurales de la biodégradation d'une algue dans un écosystème aquatique. *Bull. Acad. Soc. Lorr. Sci.* 13 (2) : 137-153.
- ROESCH C., 1927. Contribution à l'étude des Diatomées des eaux saumâtres de Lorraine. *Bull. Ass. Philom. Alsace-Lorr.* 7 (3) : 162-168.
- ROUSSARD M., 1965. Etude de la flore algologique de la moyenne et de la basse Seille. D.E.S. Fac. Sc., Nancy, 73 p.

Reçu le 17 octobre 1994; received October 17, 1994
 Accepté le 17 novembre 1994; accepted November 17, 1994

LES UTILISATIONS DES DIATOMÉES

J. VIZINET ET B. DE REVIERS¹

Muséum National d'Histoire Naturelle, Laboratoire de Cryptogamie 12, rue Buffon, 75005-Paris, France

¹Correspondance à cet auteur

ALGUE
BACILLARIOPHYCEAE
DIATOMÉES
DIATOMITE
APPLICATIONS
UTILISATIONS INDUSTRIELLES
ÉCOLOGIE
POLLUTION
DIAGNOSTIC DE LA MORT
NOYADE
AQUACULTURE
VERDISSEMENT DES HUITRES
ÉCONOMIE
REVUE

RÉSUMÉ – Du fait de l'importance de leurs gisements, les diatomites sont largement utilisées dans le monde industriel : comme filtre (grâce à leurs fines ornementations formant des microcanalisations), comme agent de charge (grâce à leur faible densité et/ou à leur capacité d'absorber des éléments permettant ainsi d'obtenir des produits de faible masse volumique et/ou de composition homogène) et comme abrasif (grâce à la dureté de la silice). Il s'agit là de la principale utilisation des Diatomées et la seule à représenter un chiffre d'affaire significatif pour l'instant. L'étendue de l'utilisation de la diatomite dans l'industrie en fait une ressource naturelle qui possède une certaine importance économique. L'utilisation des Diatomées en exploration pétrolière reste limitée au continent américain. *Hasleria oostearia*, responsable du verdissement des Huitres, a pris une ampleur économique non négligeable puisque, désormais, le consommateur assimile la couleur à la qualité; son absence des claires pourrait donc se traduire, pour les ostréiculteurs, par une diminution sensible du chiffre d'affaire. L'utilisation des Diatomées pour la mise au point de tests indicateurs de pollution des eaux douces semble se développer. Ce type de test peut être voué à un avenir prometteur si l'on parvient à le normaliser, compte tenu de l'importance croissante accordée à l'environnement et à la pression de plus en plus forte exercée par l'opinion et les pouvoirs publics sur les industries polluantes des milieux aquatiques. En ce qui concerne le milieu marin, la faible quantité d'informations concernant la lutte contre les « marées noires » à l'aide de Diatomées ne permet pas de conclure sur l'utilisation effective et à grande échelle du procédé. L'emploi des Diatomées comme indicateur halieutique pour la pêche industrielle, évoqué dans la littérature, semble avoir été une perspective annoncée un peu vite comme une réalité et leur emploi dans le diagnostic de la noyade reste encore controversé. Les Diatomées commencent à être cultivées soit comme Algues fourrage, avec une rentabilité très relative, soit comme producteurs de molécules à haute valeur ajoutée, quoique cette dernière utilisation relève encore des perspectives et de la recherche plus que de l'industrie.

ALGAE
BACILLARIOPHYCEAE
DIATOMS
APPLIED USES
ECOLOGY
POLLUTION
DROWNING
DIAGNOSIS OF DEATH
AQUACULTURE
OYSTER GREENING
ECONOMY
REVIEW

ABSTRACT – Applied uses of diatoms are reviewed. Diatomite, which is the fossil remains of diatoms, exists in extensive deposits and has large-scale industrial uses. These uses include filtration (due to the fine structure of the cell-walls), as a « charge agent » or « filler » (because of its low density and/or because of its absorptive abilities is used to make products with low volumetric mass and/or homogeneous composition) and as an abrasive (because of the hardness of the silica). Fossil diatoms have also been used in the exploration for oil, but this practice seems currently restricted to American companies. Diatoms as living resources include *Hasleria oostearia*, which is responsible for the green color in oysters. Consumers associate the green color with quality and therefore this diatom confers a positive economic value to this aquaculture product. Although steel controversial, diatoms have been used for nearly a century as bioindicators of the quality of freshwater ecosystems. The utility of diatoms as bioindicators could increase with standardized quality assurance/quality control measures since more public attention has focused on pollution of aquatic systems. In marine environments, there are some data that suggest diatoms might be used in remediation of hydrocarbon pollution; it is too early to document the efficiency of this process on a large scale. The use of diatoms as an halieutic indicator for industrial fishing seems as not yet been demonstrated with any degree of certainty and diagnosis of drowning victims with diatoms remains a topic of debate. Diatoms have been cultured as a food source for the aquaculture industry but with very low profitability. On going research and development is necessary to determine if diatoms can produce molecules of high commercial value.

INTRODUCTION

Les Diatomées (Bacillariophyceae ou Diatomophyceae) sont des « microalgues » extrêmement répandues dans la nature puisqu'elles sont aptes à coloniser tous les milieux aquatiques. Ce sont probablement les organismes aquatiques les plus répandus après les Bactéries et elles ont un rôle très important dans la production primaire (Round & Crawford, 1990). Leur caractéristique principale est la paroi siliceuse complexe nommée frustule (Ricard, 1987; Round & Crawford, 1990). L'accumulation de ces frustules a constitué des sédiments siliceux connus sous le nom de diatomite ou kieselguhr. L'intérêt économique potentiel présenté par les Diatomées et leurs différentes utilisations possibles sont liés aux caractéristiques qui viennent d'être évoquées pour les raisons suivantes. 1. Le produit résultant de l'accumulation des frustules, sédimentés en couches épaisses, susceptible d'être utilisé comme filtre, agent de charge ou abrasif, est disponible en grande quantité pour un faible coût d'exploitation, donc économiquement intéressant. 2. Les Diatomées sont présentes dans tous les domaines aquatiques, se multiplient très vite et possèdent une grande capacité à intégrer les changements chimiques intervenus dans leur environnement, elles peuvent donc être utilisées comme indicateurs de pollution. 3. Ce sont des microalgues, cultivables *in vitro*, donc utilisables comme fourrage dans des écloséries de larves d'animaux planctonophages ayant eux-mêmes un intérêt économique. 4. Elles sont susceptibles de contenir des molécules économiquement intéressantes. En outre, les espèces dangereuses pour l'homme semblent très rares : on ne connaît que *Pseudonitzschia pungens* (Synonyme de *Nitzschia pungens* Grunow in Cleve & Möller (Hasle, 1993)), (Grunow in Cleve & Möller) Hasle (Bates *et al.*, 1989), *Pseudonitzschia australis* (Fritz *et al.*, 1992) et *Pseudonitzschia seriata* (Lundholm *et al.*, 1994), qui contiennent de l'acide domoïque, cette substance se transmettant dans la chaîne alimentaire et pouvant entraîner la mort. Au chapitre des impacts négatifs imputables aux Diatomées, il faut encore mentionner leur capacité à augmenter la corrosion des aciers inoxydables lorsque ces organismes sont présents dans le biofilm situé à l'interface eau/acier (Little *et al.*, 1991).

Or, si les Algues et leurs utilisations ont fait l'objet de nombreux ouvrages (tels que : Sauvageau, 1920; Zaneveld, 1959; Boney, 1965; Johnston, 1965; Levring *et al.*, 1969; Zajic, 1970; Chapman & Chapman, 1980), il n'y est que rarement question des Diatomées et, lorsque celles-ci sont mentionnées, leurs utilisations sont fort peu détaillées. Seules, les utilisations de la diatomite ont fait l'objet de synthèses (Eardley-Wimot,

1928; Van den Broeck, 1960). En outre, le marché des Diatomées n'est pas pris en compte dans les études économiques concernant les Algues (*cf.* Boude, 1983 ou Mabeau, 1989); il était donc intéressant d'essayer de l'estimer pour connaître son importance relative par rapport à celui des macroalgues.

1. UTILISATIONS DES DIATOMÉES LIÉES À LEUR CONTENU CELLULAIRE

A. Algues-fourrage

Les Diatomées sont utilisées dans l'alimentation de jeunes stades de Bivalves marins et de Crevettes (De Pauw & Persoone, 1988), en laboratoire et industriellement. Il a ainsi été montré (Baud *et al.*, 1990) que l'apport de *Skeletonema costatum* était bénéfique pour l'élevage de la Palourde japonaise *Ruditapes philippinarum*, sur le plan qualitatif et quantitatif. Dans le même but, des Prymnésiophycées (*Isochrysis galbana*, *Pavlova lutheri*, *Pseudoisochrysis paradoxa* nom. prov.) et des Prasinophycées (*Tetraselmis suecica*) sont aussi utilisées (Chrétiennot-Dinet, 1986). Il n'y a donc aucune spécificité des Diatomées dans ce domaine. Les critères auxquels doivent répondre les microalgues pour être employées comme algues-fourrage ont été présentés par Chrétiennot-Dinet *et al.* (1986). En France, plusieurs compagnies (Vizinet, 1993) produisent des Diatomées (parmi d'autres microalgues), dont deux en quantités relativement importantes : la Station Marine de l'Île Grande (Côtes d'Armor) et la Station IFREMER de Bouin (Vendée).

La Station IFREMER de Bouin utilise une nappe d'eau souterraine salée (située dans le sous-sol de marais, à 12-15 m de profondeur, riche en NH_4^+ , en gaz carbonique et en phosphate, de pH faible et à 13 °C toute l'année) pour faire des cultures dans des bacs de 100 m³, surtout de *Skeletonema costatum*. La richesse constante de l'eau de cette nappe permet de combler les déficits nutritifs saisonniers du milieu naturel, ce qui permet d'avoir toute l'année une quantité disponible de Diatomées et de contrôler la croissance des Bivalves. La production de Diatomées est estimée à 6 tonnes par an (Vizinet, 1993) dont il resterait à préciser la teneur en matière sèche. Grâce à l'utilisation de ces eaux souterraines salées comme milieu de culture de phytoplancton, on peut obtenir une production de biomasse microalgale proche de celle atteinte dans les meilleurs milieux de culture (Robert *et al.*, 1992) et ce, avec un faible coût de production.

La Station Marine de l'Île Grande possède un réacteur permettant la culture, simplifiée et en

continu, des microalgues. Elle produit 50 à 60 tonnes de biomasse (tout compris et dont des Diatomées) à 20% de matière sèche par an (Station Marine de l'Île Grande, comm. pers.). Cette station recherche des produits possédant une activité biologique. L'extraction de telles molécules à hautes valeurs ajoutées laisse inexploité l'essentiel de la biomasse et cette entreprise cherche donc, à long terme, à valoriser le maximum des fractions obtenues lors du procédé d'extraction.

Afin d'augmenter le rendement de la culture de microalgues, Callegari (1989) présente comme une alternative intéressante développée en Extrême-Orient, la production semi-intensive du phytoplancton naturel, par induction de blooms (éclosions) grâce à l'apport de fertilisants. L'auteur ne précise pas le type de fertilisants utilisés ni l'impact sur l'environnement d'une telle pratique.

B. Verdissement des Huîtres

C'est Gaillon (1820, 1824) qui a signalé pour la première fois (sous le nom de *Vibrio ostrearius* Gaillon), le rôle de *Haslea ostrearia* Simonsen (= *Navicula ostrearia* Bory) dans le verdissement des Huîtres. Cette Diatomée, présente dans les marennes, synthétise un pigment bleu-vert, la marenne, qui diffuse dans le milieu. Ranson (1927) établit que la marenne était fixée sur les branchies du coquillage, sans que la Diatomée soit nécessairement ingérée. L'apport de ce pigment induit une coloration verte des Huîtres, mais aussi une certaine qualité gustative (Gaillon, 1820). En effet, les huîtres ingèrent les microalgues présentes dans les claires et, lors du verdissement de ces claires, *Haslea ostrearia* constitue la microalgue dominante. Or, celle-ci possède un arôme spécifique pouvant agir sur la qualité organoleptique des Huîtres (Robert, comm. pers.). Selon l'hypothèse de Ranson (1927), le mucus sécrété par les Huîtres pourrait, quand le milieu est fortement chargé d'argile, constituer la source de matière organique permettant la synthèse de la marenne. Ce mucus est formé de glucoprotéines dont l'hydrolyse de la fraction osidique aboutit à la libération de glucose, glucosamine, galactose et galactosamine (Ranson, 1927). D'après Neuville (1978), ce mucus favorise une certaine pullulation microbienne qui contribue à accélérer l'appauvrissement et la dégradation du milieu; ces conditions carencielles sembleraient être favorables à la synthèse de la marenne. L'apparition de ce pigment (Robert, 1983) entraîne une modification des caractères cytologiques. En effet, d'après cet auteur (*loc. cit.*, p. 149), la marenne est dérivée de pigments contenus dans les chloroplastes et, lors du bleuissement des individus, on note une corrélation négative entre la taille des chloroplastes et

celle des zones apicales pigmentées. Au cours de la croissance, Robert & Turpin (1993) ont mis en évidence que la marenne est libérée lorsque la phase de plateau est atteinte, elle pourrait donc être, par effet chimique, un facteur limitant de cette croissance. Ces mêmes auteurs (*loc. cit.*) ont montré que ce pigment n'a pas d'action sur la croissance de *Haslea ostrearia* pour des concentrations allant de 0,5 à 5 mg l⁻¹, la stimule pour des concentrations de 10 à 40 mg l⁻¹, et devient toxique au delà de 60 mg l⁻¹. Selon Robert (1983), un enrichissement en azote (sous forme ammoniacale et nitrique) dans les claires, conduit à une multiplication intensive de *Haslea ostrearia* et ainsi au verdissement intensif de la culture. De plus, les substances organiques excrétées par certaines espèces de Mollusques Bivalves interviendraient dans le déterminisme de ces multiplications intensives; les Huîtres, en particulier, apportent des substances organiques azotées dissoutes qui sont directement utilisables par la Diatomée. Cet auteur en déduit que l'optimisation de la production conchylicole nécessiterait l'utilisation d'amendements appropriés comme, par exemple, un enrichissement subtilement dosé en azote (organique et minéral), phosphore et silicium; ces 3 éléments pouvant être des facteurs limitants de la production algale. Ce procédé d'optimisation n'est pas utilisé actuellement. Ce qui est pratiqué, par la Société Soproma, c'est l'ensemencement en mini-claires de populations d'*Haslea ostrearia* préalablement cultivées en grand volume (6 m³) en conditions contrôlées (Robert, comm. pers.).

C. Contrôle de la pollution des eaux douces

La diversification des polluants, qui rend leur dosage de plus en plus délicat, ainsi que l'impossibilité d'utiliser des méthodes biologiques basées sur les Invertébrés pour la détection des pollutions en milieu potamique profond, ont conduit à retenir les Diatomées en tant qu'organismes intégrateurs des conditions du milieu (Coste, 1976). Les limites de l'utilisation des Algues comme bioindicateurs ont fait l'objet d'une brève synthèse par Lhotsky & Marvan (1991) et d'une synthèse plus approfondie par Coste *et al.* (1991). Quoique certaines autres Algues soient sensibles à la pollution (Shubert, 1984; Patrick & Palavage, 1994) et en soient, par conséquent, des indicateurs (l'exemple de *Fucus virsoides*, dans la mer Adriatique, peut être cité, Munda, 1993), ce sont les Diatomées qui ont fait l'objet de mise au point d'indices d'évaluation. En effet, afin d'évaluer le degré de pollution des eaux de rivières, l'utilisation d'indices diatomiques s'est révélée intéressante pour 3 raisons: les Diatomées sont aptes à coloniser tous les milieux aquatiques et subaériens, en particulier les milieux où l'influence humaine est fortement

présente, des plus propres aux plus pollués (Prygiel, 1991); elles sont faciles à échantillonner; elles possèdent aussi l'avantage d'être des organismes à cycles vitaux très courts, dont la multiplication est rapide, et donc susceptibles d'intégrer de brusques changements physico-chimiques de la qualité des eaux.

Rumeau & Coste (1988) indiquent la méthodologie à suivre pour étudier les Diatomées dans le cadre de ces contrôles. L'identification et le dénombrement des cellules permettent de déterminer la qualité des eaux, par application d'indices établis à l'aide d'un classement de nombreux taxons, en fonction de leur sensibilité ou de leur tolérance à la pollution, réalisé à partir de compilations bibliographiques ou d'ordinateurs par analyse multivariées.

Deux indices diatomiques ont été mis au point par le CEMAGREF (Eraud, 1989) : l'IPS : indice de polluo-sensibilité (il nécessite une détermination au niveau de l'espèce) et l'IDG : indice diatomique générique (il nécessite seulement une détermination générique, il est donc plus facile à utiliser). Une valeur indicielle (de 1 à 20) est ainsi obtenue, pour chaque relevé, à partir de l'abondance de chaque organisme échantillonné, en tenant compte de sa sensibilité globale et de sa valeur indicatrice.

Lafont *et al.* (1988) ont comparé 4 autres indices biologiques : l'indice biotique moyen global IBMG, l'indice de qualité biologique globale IQBG, l'indice diatomique Coste appliqué au Rhône IDCR, l'indice Oligochètes (de qualité) biologique spécifique IOBS (IBMG et IQBG prenant en considération les macroinvertébrés benthiques à un niveau de détermination simple). Ces auteurs ont ainsi constaté que l'indice diatomique IDCR apporte une information complétant celle de l'IOBS et proche de celle de l'IBMG.

La sensibilité et l'applicabilité de divers indices diatomiques mis au point à l'occasion d'études de rivières et de fleuves ont été testées dans les conditions particulières d'une station d'épuration (Iserentant & Colomb, 1991) et des eaux de rejet d'une centrale thermique (Coste & Verrel, 1978). Dans le premier cas, il ressort que des indices tels que l'indice de polluosensibilité IPS, l'indice de Leclercq & Maquet ILM, l'indice de Descy ID, l'indice diatomique générique IDG, l'indice CEE, l'indice de Sladeczek ISL (pour les références de ces indices voir Iserentant & Colomb, 1991), bien que mis au point pour les eaux courantes, sont utilisables dans le cas d'une telle station où l'eau doit séjourner un certain temps. Dans le second cas, l'observation des communautés de Diatomées benthiques récoltées en amont et dans le rejet immédiat d'une centrale thermique indique un certain nombre de modifications dans la composition des biocénoses, imputables au fonctionnement de

cette unité. Les Diatomées peuvent donc conduire à l'élaboration d'indices biologiques intéressants, et adaptables à diverses conditions de milieu (bibliographie complémentaire sur ce sujet dans Eulin *et al.*, 1993 et Coste, 1994). La méthode de Lange-Berthalot (utilisation des « espèces différentielles », 1979) est utilisée en Suisse, en Allemagne et en Autriche.

Néanmoins, Round (1991) souligne les problèmes engendrés par l'utilisation de Diatomées comme indicateurs de la qualité des eaux; celui-ci remet en cause les études corrélant la présence de certaines espèces avec un type d'eau défini. Il considère en effet qu'il existe peu de travaux relatant la présence d'espèces caractéristiques d'un environnement à caractères chimiques donnés. Patrick & Hendrickson (1993) soulignent les variations naturelles qui peuvent intervenir au sein des communautés diatomiques, hors l'intervention de tout agent extérieur. De plus, ces indices diatomiques, élaborés à partir de l'étude d'une rivière déterminée, nécessitent une réadaptation à chaque fois qu'un nouveau milieu est étudié. Par exemple, pour l'étude de la Seine, certaines méthodes ont dû être écartées car elles ne convenaient pas (Coste & Leynaud, 1973). La fiabilité de l'analyse des espèces (de Diatomées, mais aussi d'autres organismes) est discutée par Patrick & Palavage (1994) qui critiquent les méthodes d'échantillonnage et soulignent la nécessité d'une standardisation. En effet, les indices utilisés dans l'étude de la pollution des eaux ne sont actuellement soumis à aucune norme, bien que des projets existent. Toutefois, selon Descy & Coste (1991), l'indice CEE pourrait être utilisé pour une méthode standardisée applicable dans les pays européens. La difficulté de ces méthodes, pour une application de routine, réside toujours dans l'identification des Diatomées pour laquelle il est nécessaire de faire appel à un spécialiste. Pour pallier cet obstacle, Rumeau & Coste (1988) ont élaboré une clef de détermination ayant pour but de permettre l'abord de la détermination des Diatomées d'eau douce par des néophytes. Les indices actuellement utilisés en routine sont ceux figurant sur un programme PC (COCAIN : Comptage Calcul Indices) conçu par M. Coste et diffusé à la demande. Les 8 indices utilisés sont ceux de Descy, de Sladeczek, de Leclercq & Maquet, de Steinberg *et al.*, du CEMAGREF (IPS et IDG) et l'indice CEE. A partir de ce programme, un logiciel, diffusé sous le nom de OMNIDIA, a été conçu par CLCI (Lecoite *et al.*, 1993) avec le concours financier de l'Agence de l'Eau Artois Picardie.

Tout ceci n'est utilisable qu'en eau douce. De telles méthodes seraient probablement applicables en milieu marin (Coste, comm. pers.) mais cela ne semble pas correspondre à un besoin.

D. Indicateurs halieutiques

Il a été observé en mer, dans les zones d'upwellings (zones de remontée d'eau froide riche en sels nutritifs), une corrélation entre les blooms de phytoplancton, notamment de Diatomées, et une certaine abondance de divers Poissons. On constate, en effet, sur la côte nord-ouest africaine, que certaines Sardines, comme *Sardina pilchardus*, se trouvent dans les régions d'upwellings quasi permanents et que certaines Sardinelles, comme *Sardinella aurita* se trouvent dans les aires d'upwellings saisonniers (Binet, 1988). L'abondance des Sardines dans les zones de résurgences pourrait s'interpréter par le fait qu'une intensification des remontées d'eau accroît la quantité de plancton, ce qui améliore l'alimentation et la survie de leurs larves (Binet, 1988). De plus, une forte crue, porteuse de sédiments, succédant à un upwelling, pourrait lever une éventuelle limitation en silice et permettre ainsi un plus fort développement de Diatomées (Binet, 1983). Lewis (1929) constate que les Diatomées et, dans une moindre mesure, les Dinoflagellés, constituent un aliment régulier de la Sardine californienne, même si de nombreux zooplanctons sont aussi ingérés. D'ailleurs, cette Sardine s'observe souvent en bancs sur les blooms de Diatomées (Binet, 1988). D'après Nieland (1980), les Sardines pourraient se nourrir presque exclusivement de phytoplancton, dans le courant des Canaries, pendant la saison d'upwelling. Selon Bourrelly & Ardré (1974, p. 78), l'étude quantitative de *Fragilaria oceanica* dans le plancton marin se serait montrée utile pour prévoir l'abondance de *Sardinella longiceps*.

Les Diatomées pourraient donc, théoriquement, être des indicateurs halieutiques intéressants mais une telle utilisation des Diatomées reste douteuse.

E. Lutte contre la pollution par les hydrocarbures

Une Diatomée, *Chaetoceros calcitrans* consomme des hydrocarbures au moyen de deux voies métaboliques d'hétérotrophie lipidique. Cette caractéristique métabolique pourrait permettre une dépollution de l'eau de mer lors de « marées noires ». Boutry (1980) a montré qu'un hydrocarbure, lorsqu'il est présent en grande quantité dans l'eau de mer ou à sa surface, est un aliment apprécié de certaines Diatomées planctoniques marines. Il a montré que, de 0 à 8 j de culture, *Chaetoceros calcitrans* consomme 90,2 % des hydrocarbures totaux de l'eau de mer, dont 91 % des aliphatiques, et que de 8 à 16 jours de culture, il consomme 37,3 % des hydrocarbures totaux dont 57 % des aliphatiques. *Chaetoceros calcitrans* serait un consommateur sélectif efficace lors de pollution de l'eau de mer par des hydrocar-

bures et ce, avec une action rapide (Boutry, 1980), en effet, 42,2 g de cette Diatomée peuvent retirer de 23,9 à 62,5 mg d'hydrocarbures totaux de 255 litres d'eau de mer de culture (soit 84,7 % à 92,7 % des hydrocarbures présents) (Boutry, 1988). L'avantage d'utiliser des Diatomées par rapport à des Bactéries reste à démontrer. L'efficacité d'un ensemencement bactérien n'est d'ailleurs pas non plus confirmée pour le traitement d'une « marée noire » importante. L'enrichissement en nutriments des nappes résultant des « marées noires », afin de stimuler l'action naturelle des Bactéries a, en revanche, été utilisé en Alaska pour parfaire le nettoyage des plages à la suite de la pollution engendrée par l'échouage de l'*Exxon Valdez* (Pritchard *et al.*, 1992).

F. Recherche pétrolière

La contribution des Diatomées à la formation de pétrole est faible (Alpern, comm. pers.) et leur utilisation, comme indicateur en exploration, est donc relativement sporadique. L'utilisation des Diatomées comme indicateurs se pratique surtout en Amérique, pour des types particuliers de gisements en nombre restreints. Les Dinoflagellés sont plus utilisés et cette utilisation est en constant développement mais ce sont des espèces plus complexes à étudier. Les coccolithes (écailles calcaires recouvrant la paroi de certaines Prymnesiophycées) sont utilisées de manière plus récente mais aussi plus fréquente (30 à 50 % des cas, au niveau mondial). Ces coccolithes ont constitué des ensembles de roches calcaires à grains fins dont la localisation est assez bien connue. Les Chlorophytes fossiles sont, aussi, énormément utilisées, en particulier les Dasycladacées et les Botryococcales (les *Botryococcus* synthétisent naturellement des hydrocarbures, voir Largeau *et al.*, 1980).

G. Utilisation en médecine légale

La présence et l'analyse qualitative et quantitative des Diatomées dans les tissus humains sont utilisables pour diagnostiquer la mort par noyade et pour fournir des indications sur le lieu où celle-ci s'est produite. Cette méthode, toujours d'actualité (Institut Médico-Légal, Paris, comm. pers.), est controversée depuis longtemps (les revues de Peabody, 1980 et Auer, 1991). Kobayashi *et al.* (1993) ont proposé une technique de digestion enzymatique des tissus qui, au contraire des méthodes utilisant l'acide, permet d'analyser tous les organismes planctoniques et pas seulement les Diatomées. Ludes *et al.* (1994) recommandent aussi une digestion enzymatique. Matsumoto & Fukui (1993) proposent l'utilisation de Soluene-

350 dont l'action est accélérée par exposition aux ultrasons et chauffage.

H. Production de molécules à haute valeur ajoutée

L'utilisation des Diatomées comme source de molécules à haute valeur ajoutée (antibiotiques, antifongiques, acides gras, vitamines, pigments, protéines,...) (Groth-Nard & Robert, 1993, à l'occasion d'une revue exhaustive sur les lipides des Diatomées) relève encore de la recherche et des perspectives.

Les Diatomées, comme d'autres microalgues et comme certaines macroalgues, peuvent présenter une activité antibactérienne et/ou antifongique. Selon Pesando (1990 b), une activité antibactérienne est le plus fréquemment rencontrée chez les Chrysophytes et les Diatomées (au sein de ces dernières, les genres *Chaetoceros*, *Nitzschia* et *Thalassiosira* ont l'activité la plus remarquable). Aubert *et al.* (1966) ont montré l'activité antibactérienne de la Diatomée *Asterionella japonica*. Cette activité est, selon eux, vraisemblablement due à deux groupes de substances présentes dans les extraits cellulaires : les unes de nature nucléotidique, les autres relativement instables, de type acide gras. Par la suite, Viso (1987) a testé l'activité d'extraits de 15 Diatomées, incluant 11 espèces de *Chaetoceros*, sur des Bactéries gram - et gram +, sur des Bactéries marines, sur des Champignons pathogènes pour l'homme (levures, moisissures, dermatophytes) et sur des Champignons parasites de plantes méditerranéennes. 9 de ces 15 Diatomées ont montré une activité significative contre à la fois les Bactéries et les Champignons; la plus grande activité ayant été trouvée chez *Asterionella glacialis* et *Chaetoceros lauderi*. Des travaux ont montré que *C. lauderi* produit un polysaccharide ionique acide de masse moléculaire élevée, responsable de l'activité antifongique et antibactérienne de la Diatomée (Gueho *et al.*, 1977; Pesando *et al.*, 1979-1980; Pesando, 1990 a). Le composé actif, extrait de cette Algue, présente une forte activité antibactérienne sur *Staphylococcus epidermitis* (50 µg provoquent une lyse de 5 mm), inhibe le développement de *Microsporum gypseum* et *Sporothrix schenckii* Hekt et Perkins (la concentration minimale inhibitrice est de 150 à 200 µg ml⁻¹) (Pesando *et al.*, 1979-1980) et est actif contre 3 Champignons du genre *Fusarium* Link, parasites de plantes (Viso, 1987). Chez *Asterionella notata*, la fraction active de l'extrait cellulaire possède une activité antibactérienne aussi importante que celle des antibiotiques (Gauthier, 1969). Cet auteur, qui se réfère à la définition des antibiotiques donnée par l'OMS (Organisation Mondiale pour la Santé), considère que cet extrait cellulaire, actif à des doses très faibles

(de 1 à 0,005 µg ml⁻¹), contiendrait bien une substance antibiotique. Les Diatomées contiennent des substances bactéricides, mais leur sélectivité n'est pas telle que l'on puisse parler d'antibiotiques au sens thérapeutique du terme. En revanche, le rôle de ces substances sur un plan écologique est à considérer. *A. notata*, malgré une abondance relativement faible par rapport à d'autres organismes phytoplanctoniques, joue un rôle quantitativement très important, à la fois dans les phénomènes d'épuration de l'eau de mer vis-à-vis des germes terrigènes polluants et dans l'écologie marine proprement dite (Gauthier, 1969). D'après Gauthier *et al.* (1978), la fonction antibactérienne de *A. japonica* et *C. lauderi* peut être qualitativement ou quantitativement modifiée par certains médiateurs chimiques libérés dans le milieu par d'autres végétaux planctoniques qui leurs sont associés en culture, comme par exemple le Dinoflagellé *Prorocentrum micans*. Dans ce cadre, il est possible que l'association des espèces antibiotico-productrices, comme les Diatomées, avec d'autres espèces, comme *P. micans*, représente une certaine régulation des propriétés épuratrices du milieu (Gauthier *et al.*, 1978).

2. UTILISATIONS DES DIATOMÉES LIÉES À LEUR FRUSTULE SILICEUX

A. Utilisation de terre de Diatomées pour tromper la faim

Cette utilisation est indiquée par Mann (1905, p. 57) et Taylor (1929, p. 84). Taylor précise que, en cas de famine, les habitants les plus pauvres de certains pays d'Europe mais aussi de Java, du Mexique ou de Terre de Feu, ajoutent de la terre de Diatomée à la nourriture, afin d'obtenir l'impression d'avoir l'estomac plein. Taylor ajoute que ces pratiques pourraient être une des explications à l'usure des dents de machoires d'hommes préhistoriques.

B. Evaluation du pouvoir séparateur de microscopes

«C'est aux travaux des diatomistes et à leurs continuelles demandes aux opticiens que nous devons les merveilleux perfectionnements réalisés sur les objectifs» disait J.E. Smith (*in* Van Heurck, 1880-1881, avant-propos). De fait (Desikachary, 1954), certains microscopes, pas assez performants, ne permettaient pas d'observer avec précision l'ornementation, particulièrement fine, des frustules de certaines Diatomées. *Amphipleura pellucida* (40 stries en 10 µm) constitue un excellent test pour vérifier la qualité et le pouvoir de

définition des objectifs microscopiques à immersion (Bourrelly, comm. pers.). Cette fine ornementation des Diatomées permet de tester le pouvoir de résolution d'un microscope électronique (Krause, 1936; Prebus & Hillier, 1939; Mahl, 1939) et de microscopes photoniques. Toutefois, selon Prebus & Hillier (1939), les Diatomées ne permettent pas de déterminer la limite de capacité de résolution d'un microscope électronique, leurs contours n'étant pas assez bien définis. Ces tests n'ont plus désormais qu'un intérêt historique.

C. Utilisation en sciences de la terre et de l'environnement

Les assemblages de Diatomées sont de plus en plus utilisés en écologie et paléoécologie, tant en milieu lacustre qu'en milieu marin, et ceci pour de multiples raisons : 1) leurs distributions sont fortement corrélées avec plusieurs facteurs écologiques tels que le type d'habitat (benthique, planctonique), le pH, la concentration en sels et la composition ionique, le niveau trophique, la température, etc.; 2) les Diatomées ont une durée de vie brève assurant la haute résolution temporelle des enregistrements; 3) leur carapace siliceuse facilite leur fossilisation; 4) la détermination taxinomique des Diatomées fossiles, basée sur cette structure siliceuse, peut être conduite au niveau de l'espèce ou de la variété; 5) les assemblages actuels et fossiles sont souvent très diversifiés et contiennent donc un vaste stock d'information; 6) les restes siliceux sont souvent très abondants dans les sédiments (10^6 à 10^9 valves cm^{-3}). Ces caractéristiques permettent des analyses quantitatives rigoureuses. Les progrès considérables réalisés lors de la dernière décennie sont essentiellement dus au développement des méthodes statistiques (fonctions de transfert) bien adaptées à la calibration des variables à partir des associations actuelles (Gasse & Tekaia, 1983; Ter Braak & Van Dam, 1989; Birks *et al.*, 1990a).

Sur les continents, l'une des applications récentes les plus spectaculaires est l'étude, menée aux échelles nationale, internationale et même intercontinentale, de l'impact des pluies acides sur les écosystèmes lacustres d'Amérique du Nord et d'Europe (Charles & Whitehead, 1986; Charles *et al.*, 1989; Sullivan *et al.*, 1990; Birks *et al.*, 1990b; Battardee & Renberg, 1990). Les bases de données établies dans ce contexte sont aujourd'hui utilisées pour retracer l'évolution du niveau trophique (Whitmore, 1989) ou la pollution engendrée par l'activité anthropique au cours des dernières centaines d'années. A l'échelle de temps du millénaire, les Diatomées permettent d'appréhender des variables reliées aux grands changements climatiques. Ainsi, dans les régions à déficit hydrologique, les variations de la balance « précipitations/évaporation » entraînent des variations

de profondeur, de volume et de concentration en sels des lacs. Les variations de profondeur sont déduites qualitativement du rapport « espèces planctoniques/espèces benthiques ». Les corrélations quantitatives entre assemblages de diatomées, salinité et composition ionique des eaux, sont solides (Gasse *et al.*, 1983; Servant-Vildary & Roux, 1990a; Fritz, 1990; Gasse *et al.*, 1995) et les modèles prédictifs, testés sur des milieux dont on connaît l'évolution par des mesures (Fritz, 1990), sont maintenant appliqués à des séquences fossiles (Gasse *et al.*, 1990; Fritz *et al.*, 1991; Roux *et al.*, 1991). Bien que les corrélations directes avec la température des eaux ne soient pas clairement établies, les paléotempératures ont été reconstituées dans quelques études (Servant-Vildary & Roux, 1990b). La durée d'englacement des lacs arctiques (Smol, 1986), la localisation du front des glaciers (Clark, 1989), les variations saisonnières du brassage/stratification, du niveau trophique et de la productivité des lacs sont également des paramètres abordés par l'étude des Diatomées lacustres (Whitmore, 1989; Bradbury, 1993).

En milieu marin, où les teneurs en ions majeurs sont relativement stables, les Diatomées s'avèrent être de bons enregistreurs de la température de surface océanique (Pichon *et al.*, 1987; 1992). Une autre application importante pour la compréhension des changements de la circulation océanique, facteur agissant sur le climat de la planète, est la reconstruction de l'intensité des upwellings par l'estimation de la productivité primaire en Diatomées (Schrader, 1992).

Par ailleurs, le rapport des isotopes de l'oxygène de la silice des Diatomées est fonction de la température et de la composition isotopique des eaux (Labeyrie, 1982). Cette méthode d'investigation est prometteuse, bien qu'encore rarement utilisée (Juillet-Leclerc & Schrader, 1987).

Les Diatomées sont également un bon outil biostratigraphique. C'est dans le domaine marin, où elles sont connues depuis le Jurassique supérieur, que cette science est la plus avancée (voir Barron, 1985; Ferner, 1985). En milieu continental, où les plus anciennes connues remontent à l'Eocène, les données biostratigraphiques progressent rapidement avec le développement des techniques de mesure d'âges absolus. L'apparition et la distribution stratigraphique de plusieurs genres de diatomées centriques dont certains sont actuellement éteints, en particulier des Thalassiosiraceae, paraissent synchrones sur différents continents (Krebs *et al.*, 1987; Fourtanier, 1987; Kuehlthau-Serieyssol, 1993).

D. La diatomite et ses utilisations industrielles

A la mort des Diatomées, les frustules siliceux, insolubles, se conservent bien, et s'accumulent

avec les sédiments dans les fonds des océans et des lacs. Il se forme une roche sédimentaire : la diatomite ou kieselguhr, du mot allemand « terre fermentée ». On rencontre d'autres terminologies ou variantes orthographiques : kieselgur, kieselgühr, farine fossile, terre de Diatomées, randanite, tripoli,... ; le nom *tripoli* est d'ailleurs incorrect, quoique historiquement le premier attribué à la diatomite (Van den Broek 1960, p. 63).

Les principaux gisements de diatomite ont été listés par Van den Broeck (1960). Les dépôts sont, pour la plupart, d'origine marine, peu sont d'origine lacustre (Van den Broek, *op. cit.*, p. 49). Le plus important se situe en Californie (dans la zone de Santa Maria en couches épaisses d'environ 1 000 m et à Lompoc avec des couches d'environ 600 m, Van den Broek, *op. cit.*, p. 49, pour des superficies de plusieurs km²). Il en existe d'autres, non listés par Van den Broek, comme, par exemple, sur le plateau des Kerguelen (océan Indien austral, à 1 500 m de fond) ou dans le sud du bassin Indien (à 5 270 m de fond), dans le bassin Indien central. Dans ce dernier, les Diatomées et les autres microorganismes à squelette siliceux ne contribuent que pour 5 à 10 % aux dépôts des profondeurs modérées, mais en dessous d'une profondeur de 4 900 m en moyenne, les dépôts calcaires ne peuvent plus se former en raison de leur dissolution. Les diatomites rouges prennent alors le relais des dépôts calcaires. Cette diatomite, après extraction, peut être utilisée telle quelle ou après traitement.

1. Utilisation en cosmétologie

La diatomite, tamisée afin d'obtenir la granulométrie voulue, puis stérilisée, est ajoutée à des crèmes à usage dermatologique externe, ce qui permet, grâce à son caractère abrasif, une élimination des peaux mortes et un *peeling* des couches superficielles de l'épiderme.

La diatomite a comme avantage d'être d'origine naturelle, donc d'avoir une bonne image de marque, et, au plan technologique, par rapport au sable, de posséder un pouvoir abrasif plus doux et une structure plus poreuse. De plus, la diatomite possède un certain pouvoir adsorbant qui permet la fixation préférentielle de certaines substances comme, par exemple, le sébum.

2. Utilisation par d'autres industries

La diatomite est utilisée pour de nombreuses applications industrielles par suite de sa résistance aux hautes températures, de son inertie vis-à-vis des acides et des bases et de sa capacité à absorber et à retenir 2,5 fois son propre poids de liquide (Van den Broeck, 1960). Cet auteur récapitule les propriétés physiques de la diatomite, les diverses qualités de diatomites, les aspects à prendre en

compte pour la rentabilité de l'exploitation d'un gisement, ainsi que les consommations aux Etats-Unis de 1921 à 1956.

Après avoir été extraite, la diatomite est successivement concassée, séchée, broyée, puis calcinée afin d'éliminer les impuretés (alumine, oxyde de fer, sels solubles, sable et matières organiques) (Anonyme, 1986). Le produit final est soumis à une sélection granulométrique et peut alors être utilisé dans diverses applications. Les suivantes ont été exposées en détail par Van den Broek (1960) : utilisation comme filtre, agent de charge, agent abrasif, agent isolant, agent absorbant, emballage, support de catalyseur, stabilisant d'explosifs, utilisation pour l'épuration de l'acétylène, l'amélioration de l'efficacité décolorante du charbon actif, la modification des propriétés physiques des produits bitumeux, utilisation avec l'amiante, fabrication du bleu outremer, du noir de silice, utilisation dans l'industrie des peintures (peintures mates en particulier), papiers, bétons, allumettes, caoutchoucs, plastiques, linoléums, aciers, encres, pour la dispersion de produits de traitements agricoles (bouillie bordelaise, désherbants, insecticides), en dentisterie (empreintes dentaires), en fait, toute industrie dans laquelle l'utilisation d'un produit inerte et léger peut être intéressante.

Nous présentons ci-dessous quelques exemples d'utilisations industrielles de diatomite, pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter à Van den Broek (1960) et Vizinet (1993).

– **Peintures.** Outre des avantages techniques, la diatomite, grâce à sa capacité de diminuer la masse volumique, permet d'obtenir un plus grand volume de produits finis. Or, les peintures sont vendues au volume, ce qui permet d'accroître la marge commerciale sur ces produits. La diatomite permet aussi un contrôle de la perméabilité à la vapeur de la peinture une fois étendue. En effet, dans les endroits humides, elle laisse cette vapeur d'eau se dégager sans abîmer ni cloquer la couche de peinture. De même, les solvants utilisés s'évaporent plus facilement et la peinture sèche plus vite. L'ajout de diatomite dans une peinture contenant du carbonate de calcium augmente sa capacité à résister aux fortes températures.

– **Papiers.** Les caractéristiques de la diatomite, intéressantes pour l'industrie papetière, sont : sa grande porosité, son effet de brillance, son inertie et sa large surface recouvrante. Elle est un agent de faible densité n'augmentant pas la masse volumique du produit final. Elle procure à des matériaux, comme les papiers, une meilleure capacité d'absorption. Elle rend les papiers opaques et ce, à faible coût. Elle permet que les feuilles de papiers n'adhèrent pas entre elles. Enfin, les fibres, grâce à la diatomite, sont mieux homogénéisées.

– **Bétons.** La diatomite permet une augmentation de l'homogénéité du produit, de sa maniabilité et une diminution du nombre de grumeaux. Le béton, ainsi traité, est plus durable, plus perméable et s'effrite moins. La diatomite se combine en outre avec la chaux provenant de l'hydratation du ciment, ce qui améliore la qualité du durcissement.

– **Produits utilisés en agriculture.** L'agriculture utilise un certain nombre de composés toxiques qui sont vendus à des concentrations élevées, sous forme visqueuse ou même solide. La diatomite permet de les « diluer » dans un volume restreint. Les produits ainsi obtenus sont facilement et régulièrement épandables. En outre, la diatomite, là encore, permet une augmentation de volume par une diminution de la masse volumique et donc une économie de fret.

– **Produits pour prendre les empreintes dentaires.** La diatomite procure l'inertie, le volume, l'absorption d'huile et la porosité nécessaire qui contrôlent les propriétés d'expansion et de contraction de ces produits quand l'eau est ajoutée pour former la pâte à empreintes.

– **Allumettes.** La diatomite absorbe et aide à disperser l'élément actif chimique utilisé pour fabriquer l'extrémité des allumettes. Elle apporte la porosité nécessaire au contrôle de la combustion ce qui limite l'effet de rougissement des allumettes. Ce fut une des premières applications de la *Celite*[®] (marque déposée de diatomite).

– **Pneus et matières en caoutchouc.** Les caoutchoucs à faible prix de revient proviennent d'un mélange contenant beaucoup d'huile. Au cours de leur fabrication, la diatomite est ajoutée à l'huile comme absorbant, ce qui facilite le mélange et permet d'obtenir des matières en caoutchouc de meilleure résistance.

– **Containers à acétylène.** Ces containers doivent avoir, sur leur surface interne, une masse très solide et poreuse qui absorbe les gaz et élimine les risques d'explosion. Cette masse est habituellement composée de matières fibreuses et de charbon de bois liés entre eux en une masse poreuse légère, par une réaction complexe calcium-silicate entre la diatomite et la chaux éteinte. Sa rapidité de réaction et sa faible densité font de la diatomite un élément fondamental de cette réaction.

– **Asphalte, vernis et mastics.** La diatomite est utilisée pour des applications aussi variées que les vernis des pipe-line, la mise en place des jointures de routes ou les mastics. En ajoutant seulement 1 à 5 % de diatomite à de tels matériaux, leurs capacités de rebondissement et d'élasticité sont augmentées et leur fragilité diminuée. Les problèmes de craquelures engendrés par des changements rapides de température sont ainsi réduits.

– **Produit d'isolation chaux-silice.** Ces produits utilisant la diatomite apportent résistance, lé-

gèreté et efficacité thermique, dans une variété d'applications industrielles. La diatomite est la source historique de silice pour la fabrication du bleu « outre-mer ».

– **Élimination du fluor.** La diatomite se combine avec le fluor lors de la fabrication d'acide phosphorique destiné à l'élaboration de phosphates pour l'alimentation animale; elle permet ainsi de l'éliminer.

– **Éléments isolants de sécurité.** La diatomite calcinée, aussi bien que naturelle, est largement utilisée dans la fabrication d'isolants, pour des abris résistants au feu, comme les caves ou des lieux de stockage. La *Celite*[®], ajoutée à la combinaison habituelle du *ciment de Portland*, absorbe l'eau, fournit un ensemble qui flotte et permet de constituer des matériaux d'isolation de faible poids.

– **Agent abrasif.** La silice des Diatomées, très résistante à une action mécanique, est un très bon agent polissant. La structure très ouvragée des frustules s'effondre lorsqu'on la soumet à une forte pression; selon l'intensité de la pression, on obtient donc des agents lustrants constitués de particules de tailles différentes. Ces agents peuvent ainsi être des plus « agressifs », grâce à de grosses particules de silice, et utilisés pour polir certains métaux, ou des plus « doux », avec des particules très petites, pour des surfaces fragiles. La diatomite est aussi utilisée comme abrasif dans les pâtes dentifrices.

– **Stabilisant d'explosifs.** Alfred Nobel utilisa la diatomite, qui a la propriété d'imprégner la nitroglycérine, dans le procédé de fabrication de la dynamite (Volesky *et al.*, 1970). L'actualité de cette utilisation serait à confirmer; Bourrelly & Ardré (1974, p. 79) précisaient déjà que la diatomite tendait à être remplacée par la sciure de bois.

– **Fabrication de briques.** La diatomite a été utilisée historiquement en 532 après Jésus-Christ afin de fabriquer des briques légères lors de la construction de la Cathédrale Sainte Sophia à Constantinople (Volesky *et al.*, 1970).

3. Règles de sécurité régissant l'emploi de la diatomite dans l'industrie

L'utilisation de la diatomite dans une industrie est soumise à des règles de sécurité (voir Vizinet, 1993). En effet, la diatomite constitue un produit sec très pulvérulent, entraînant des cas de silicose : maladie provoquée par la détérioration des vaisseaux pulmonaires due à l'inhalation de fines particules de silice (Fattoruso & Ritter, 1988). Cette maladie a été observée chez un employé de teinturerie pressing qui avait à manipuler de la diatomite au cours de son travail (Seitz *et al.*, 1982). En effet, la diatomite sert, dans une teinturerie, à régénérer le solvant (tri ou perchloré-

thylène) contenant les salissures solubles et insolubles. Même dans une teinturerie, des mesures de prévention sont à prendre : mise en place d'une aspiration bien conduite ou utilisation de poudres non dangereuses.

CONCLUSION : IMPACT ÉCONOMIQUE DES UTILISATIONS DES DIATOMÉES

Les Diatomées sont utilisées dans de nombreux domaines et représentent, au moins par l'exploitation de leurs gisements fossiles, une part non négligeable et habituellement non prise en compte, du marché des Algues.

Les utilisations des Diatomées liées à leur nature microalgale ne représentent pas, pour l'instant, un marché important sur le plan industriel. *Haslea ostrearia*, qui est essentiel pour l'obtention d'un produit final correspondant à l'image que l'on en a faite dans l'esprit des consommateurs (vert = meilleur), possède malgré tout un impact économique sur l'activité conchylicole : lorsque le verdissement ne se produit pas naturellement, il se crée un marché pour l'obtention du verdissement par un autre moyen.

La culture des algues-fourrage, vendues nécessairement à bas prix, n'apparaît pas très rentable. En outre, ces algues sont encore produites en relativement faible quantité. La recherche de molécules à haute valeur ajoutée paraît, bien sûr, plus attractive mais reste à développer.

L'impact économique de l'utilisation des Diatomées comme indicateur de pollution des eaux douces est encore à l'état de développement. L'utilisation des Diatomées pour lutter contre les « marées noires » reste à démontrer au vu des informations actuellement disponibles et n'a vraisemblablement pas été utilisée à grande échelle. Les autres utilisations évoquées (médecine légale, recherche pétrolière) n'ont, par nature, que peu d'impact économique direct.

Il existe principalement deux entreprises, en France, exploitant la diatomite : la C^{ie} Celite (USA, également implantée dans d'autres pays), exploite le gisement de Murat (France) et aussi ceux de Lompoc (Californie, Etats-Unis), de Cuney (Etat de Washington, Etats-Unis), de Alicante (Espagne), de Guadalajara (Mexique) et du lac Myvatn (Islande ; la diatomite en est extraite par pompage ; la capacité de ce site est de 42 000 tonnes annuelles de diatomite desséchée, fournissant, lorsque l'usine travaille toute l'année, 24 000 tonnes de produits finis) ; la C^{ie} Ceca (France), utilise les gisements de Riom-ès-Montagne (Cantal), et de Saint-Bauzile (Ardèche). D'autres compagnies sont installées aux Etats-Unis, les plus importantes étant Dicalite et Eagle Picture.

Du fait de la structure particulière de la diatomite et de la qualité de sa silice, le sable peut difficilement la concurrencer ; la silice de synthèse, en revanche, plus fine et moins hydrophile, la remplace dans certaines applications comme l'addition d'un antimottant (produits empêchant la formation d'agréats, de « mottes ») dans les produits agro-alimentaires (Assoumani, comm. pers.).

Le transport de la diatomite n'est pas réglementé, il peut s'effectuer librement entre les pays. En 1991, les importations françaises représentaient une masse de 17 458 tonnes dont 11 270 tonnes provenant des Etats-Unis, 3 206 tonnes d'Allemagne et 1 896 tonnes du Danemark ; le tout correspondant à une valeur totale de 33 804 kF. Les exportations représentaient une masse de 35 767 tonnes, d'une valeur de 76 846 kF, et se dirigeaient principalement vers l'Allemagne avec 14 830 tonnes, pour une valeur de 31 134 kF (chiffres obtenus auprès du service des renseignements statistiques des Douanes).

Le chiffre d'affaire (C.A.) de la C^{ie} Celite est d'environ 84 MF (Vizinet, 1993). Ce C.A. est à comparer avec celui de la SECMA : 130 MF (Briand, 1989) pour le maërl qui est aussi un sédiment à base d'algues. On constate que le C. A. de la compagnie Celite représente 65 % de celui effectué pour le maërl, ce qui est loin d'être négligeable. De plus, il faudrait ajouter au C.A. de cette compagnie celui de la CECA, ce qui augmenterait encore la part de marché occupée par la diatomite. Le C. A. représenté par les ventes de la diatomite correspond à 28 % de celui (300 MF) annoncé par Mabeau (1989) pour l'industrie des phycocolloïdes et à 19 % du C.A. total pour la filière algue (450 MF : 300 MF pour les phycocolloïdes et 150 MF pour les produits finis ; Mabeau, 1989). Le marché de la diatomite représente donc une part relativement importante du marché des algues et est à comparer avec la quasi-inexistence de celui des Diatomées utilisées en raison de leur nature microalgale.

REMERCIEMENTS – Nous remercions les organisateurs du 13^e colloque de l'ADLAF, en particulier C. Riaux-Gobin qui a aimablement accepté de présenter cette communication en notre absence. Nous sommes redevables à Messieurs M. Coste et J.P. Kociolek d'avoir bien voulu effectuer une lecture critique du manuscrit et à Madame F. Gasse d'avoir considérablement amélioré le paragraphe « Utilisation en sciences de la terre et environnement ». Nous remercions encore ces trois personnes, ainsi que Monsieur B. Ludes, pour nous avoir utilement indiqué quelques références bibliographiques complémentaires ; nous devons aussi à J.P. Kociolek de nous avoir aidés à traduire le résumé en anglais. Il nous est impossible de citer ici tous ceux qui ont bien voulu contribuer à étoffer l'enquête de J. Vizinet qui constitue la base de cet article. Leur liste figure dans son mémoire, nous leur exprimons à nouveau notre gratitude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anonyme, 1986. La diatomite. Une silice fossile pas toujours amorphe. Enquête. *Trav. Sec. nov.* : 595-598.
- AUBERT M., AUBERT J., GAUTHIER M., PESANDO D. & DANIEL S., 1966. Origine et nature des substances antibiotiques présentes dans le milieu marin, VIème Partie : Etude biochimique des substances antibactériennes extraites d'*Asterionella japonica* (Cleve). *Rev. Intern. Oceanogr. Med.* 4 : 23-37.
- AUER A., 1991. Qualitative Diatom Analysis as a Tool to Diagnose Drowning. *Amer. J. For. Med. Path.* 12 (3) : 213-218.
- BARRON J.A., 1985. Miocene to Holocene planktonic diatoms. In : Sounders J., Bolli H.M. & Perch-Nielsen K. (eds.), *Plankton Stratigraphy*, Cambridge University Press, 763-809.
- BATES S.S. *et al.*, 1989. Pennate diatom *Nitzschia pungens* as the primary source of domoic acid, a toxin in shellfish from Eastern Prince Edward Island, Canada. *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 456 : 1203-1215.
- BATTARBÉE R.W. & RENBERG I., 1990. The surface water acidification project (SWAP) Paleolimnology programme. In Battarbee R.W. *et al.*, *Paleolimnology and Lake acidification*. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, série B, 327 : 227-232.
- BAUD J.-P., HAURE J. & GARNIER J., 1990. Effets de l'apport de phytoplancton (*Skeletonema costatum*) sur la croissance et les variations de la composition biochimique de la palourde japonaise *Ruditapes philippinarum* cultivée en marais. *Oceanis* 16 (5) : 391-408.
- BINET D., 1983. Phytoplancton et production primaire des régions côtières à upwellings saisonniers dans le Golfe de Guinée. *Océanogr. trop.* 18 (2) : 331-355.
- BINET D., 1988. Rôle possible d'une intensification des alizés sur le changement de répartition des sardines et sardinelles le long de la côte ouest africaine. *Aquat. Living Resour.* 1 : 115-132.
- BIRKS H.J.B., JUGGINS S. & LINE J.M., 1990a. Lake-surface water chemistry reconstruction from paleolimnological data. In Mason B.J. (ed.), *The Surface Waters Acidification Programme*, Cambridge University Press, 301-313.
- BIRKS H.J.B. *et al.*, 1990b. Diatoms and pH reconstruction. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, série B, 327 : 263-278.
- BONEY A.D., 1965L. Aspects of the biology of the seaweeds of economic importance. *Adv. Marine Biol.* 3 : 105-253.
- BOUDE J.P., 1983. Les végétaux aquatiques. Etats et potentialités : l'analyse économique. *Biomasse actualités*, n° spécial 3, suppl. n° 12 : 38-41.
- BOURRELLY P. & ARDRÉ F., 1974. Les Chromophytes. In : Grande encyclopédie alpha des sciences et des techniques, Tome 1, Botanique; Grange Batelière, Paris, Editions Kister, Genève, Erasme, Bruxelles, Anvers, pp. 70-92.
- BOUTRY J.-L., 1980. Puissance, sélection et rapidité d'action de la diatomée marine *Chaetoceros calcitrans* Paulsen face aux lipides de son environnement : sa réaction à un hydrocarbure marqué, le dotriacontane 16-17 ¹⁴C. *Cryptogamie Algologie* 1 (4) : 321-326.
- BOUTRY J.-L., 1988. La diatomée marine *Chaetoceros calcitrans* Paulsen peut-elle aider l'homme à purifier la mer? In : Delépine R., Morand P. & Gaillard J. (éditeurs), *Valorisation des algues et autres végétaux aquatiques*, IFREMER-CNRS Brest, Paris, p. 83-84.
- BRADBURY J.P., 1993. Holocene diatom paleolimnology of Elk Lake, Minnesota. In Bradbury J.P. & Dean W.E. (eds.) *Elk Lake, Minnesota : Evidence for rapid climate change in the north-central United States*. *Geol. Soc. America, Special Paper*, 276.
- BRIAND X., 1989. Le lithothamne : tradition d'hier et agrochimie de demain (*Lithothamnium : a tradition of the past and its role in tomorrow's agrochemistry*). *Oceanis* 1 (5) : 693-739.
- CALLEGARI J.-P., 1989. Feu vert pour les microalgues. *Biofutur*, Février 1989 : 25-40.
- CHAPMAN V.J. & CHAPMAN D.J., 1980. *Seaweeds and their uses*. Chapman & Hall, London, 334 p.
- CHARLES D.F. *et al.* 1989. Paleoeological analysis of lake acidification trends in North America and Europe using diatoms and chrysophytes. In Norton S.A., Lindberg S.E. & Page A.L. (eds.), *Acidic precipitation, Soils, Aquatic Processes, and Lake Acidification*, New York, Springer-Verlag, Vol. 4, p. 207-276.
- CHARLES D.F. & WHITEHEAD D.R., 1986. The PIRLA project : paleoeological investigation of recent lake acidification. *Hydrobiologia* 143 : 13-20.
- CHRÉTIENNOT-DINET M.-J., ROBERT R. & HIS E., 1986. Utilisation des « Algues-fourrage » en aquaculture. *Ann. Biol.* 25 (2) : 97-119.
- CLARK P.U., 1989. Late quaternary chronology and environments of Squaare Lake, Torngat Mountains, Labrador. *Can. J. Earth Sci.* 25 : 2130-2144.
- COSTE M., 1976. Contribution à l'écologie des diatomées benthiques et périphytiques de la Seine : Distribution longitudinale et influence des pollutions. Société Hydrotechnique de France. 14^e journées de l'hydraulique (Paris, 1976). Question 3, rapport 9 : 1-7.
- COSTE M., 1994. Les variables biologiques : des indicateurs de l'état de santé des écosystèmes aquatiques. Séminaire National Variables biologiques, 2-3 novembre 1994 - GIP Hydrosystème - Ministère de l'Environnement - AGHTM, 136-152.
- COSTE M., BOSCA C. & DAUTA A., 1991. Use of algae for monitoring rivers in France. In : Whitton B.A., Rott E. & Friedrich G. (eds.), *Use of algae for monitoring rivers*, Institut für Botanik, Universität Innsbruck, ISBN 3-9500090-0-0, p. 75-88.
- COSTE M. & LEYNAUD G., 1973. Etudes sur la mise au point d'une méthode biologique de détermination de la qualité des eaux en milieu fluvial, 36 p. + annexes.
- COSTE M. & VERREL J.-L., 1978. Incidences du réchauffement des eaux de Seine sur la composition de la microflore diatomique benthique. *Cah. Lab. Montereau* 6 : 27-44.

- DE PAUW N. & PERSOONE G., 1988. Microalgae for aquaculture. In : Borawitska M.A. & Borowitska L.J. (eds.) *Microalgal biotechnology*, Cambridge University Press, Cambridge, p. 197-221.
- DESCY J.-P. & COSTE M., 1991. A test of methods for assessing water quality based on diatoms. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **24** : 2112-2116.
- DESIKACHARY T.V., 1954. Electron Microscope Study of Diatom Wall Structure. VI. *Mikroskopie* **9** (5-6) : 168-178.
- EARDLEY-WILMOT V.L., 1928. Diatomite. Its Occurrence, Preparation and Uses. Canadian Department of Mines, number 691, Ottawa, 182 p.
- ERAUD Y., 1989. Qualité des eaux et Méthodes biologiques. Journée d'information « Paramètres de mesure de la pollution et de ses effets », 9 p.
- EULIN A., GRUARIN C., LAVILLE H. & LE COHU R., 1993. Evaluation de la qualité de l'eau de la Garonne par référence spéciale aux indices diatomique et chironomidien. *Annales Limnol.* **29** (3-4) : 269-279.
- FATTORUSSO V. & RITTER O., 1988. *Vademecum clinique*, 12^e édition : p. 818-821.
- FERNER J., 1985. Late Cretaceous and Paleocene Planktonic diatom stratigraphy. In Sounders J., Bolli H.M. & Perch-Nielsen K. (eds.), *Plankton Stratigraphy*, Cambridge University Press, p. 713-762.
- FOURTANIER E., 1987. Diatomées néogènes d'Afrique; approche biostratigraphique en milieu marin (sud-ouest africain) et continental. Thèse Doct. Univ. Paris VI, Paris, 365 p.
- FRITZ L., 1990. Twentieth-century salinity and water-levels fluctuations in Devils Lake, North Dakota: test of a diatom-based function. *Limnol. Oceanogr.* **35** : 1771-1781.
- FRITZ L. *et al.*, 1991. Reconstruction of past changes in salinity and climate using a diatom-based transfer function. *Nature* **352** : 706-708.
- FRITZ L. *et al.*, 1992. An outbreak of domoic acid poisoning attributed to the pennate diatom *Pseudonitzschia australis*. *J. Phycol.* **28** : 439-442.
- GAILLON B., 1820. Des huîtres vertes et des causes de cette coloration. *J. phys.* **91** : 222-225.
- GAILLON B., 1824. Observations sur la cause de la coloration des huîtres et sur les animalcules qui servent à leur nutrition. *Mém. Soc. linn. Calvados* : 135-158.
- GASSE F., JUGGINS S. & BEN KHELIFA L., 1995. Transfer functions. *Paleogeogr., Paleoclimat., Paleoecol.*, in press.
- GASSE F., TALLING J.F. & KILHAM P., 1983. Diatom assemblages in East Africa: classification, distribution and ecology. *Rev. Hydrobiol. trop.* **16** (1) : 3-34.
- GASSE F. *et al.*, 1990. The arid-humid transition in the Sahara and the Sahel during the last deglaciation. *Nature* **346** : 141-146.
- GASSE F. & TEKAIA F., 1983. Transfer function for estimating paleoecological conditions (pH) from East African diatoms. *Hydrobiologia* **103** : 85-90.
- GAUTHIER M., 1969. Activité antibactérienne d'une diatomée marine: *Asterionella notata* (Grun). *Rev. Intern. Oceanogr. Méd.* **15-16** : 103-171.
- GAUTHIER M.-J., BERNARD P. & AUBERT M., 1978. Modifications de la fonction antibiotique de deux diatomées marines, *Asterionella japonica* (Cleve) et *Chaetoceros lauderi* (Ralfs) par le dinoflagellé *Prorocentrum micans* (Ehrenberg). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* **33** : 37-50.
- GROTH-NARD C. & ROBERT J.-M., 1993. Les lipides des diatomées. *Diatom Research* **8** (2) : 281-308.
- GUEHO E., PESANDO D. & BARELLI M., 1977. Propriétés antifongiques d'une diatomée *Chaetoceros lauderi* Ralfs cc. *Mycopathologia* **60** (2) : 105-107.
- HASLE G.R., 1993. Nomenclatural notes on marine planktonic diatoms. The family Bacillariaceae. *Nova Hedw. Beih.* **106** : 315-321.
- ISERANTANT R. & COLOMB P., 1991. Les diatomées benthiques dans une station d'épuration à macrophytes et leur utilisation comme bioindicateurs. Actes du XI^e Colloque des Diatomistes de Langue Française, Douai, 24-27 septembre 1991, p. 113-130 + 5 planches.
- JOHANSEN J.R., 1993. Cryptogamic crusts of semiarid lands of North America. *J. Phycol.* **29** (2) : 140-147.
- JOHNSTON H.W., 1965. The biological and economic importance of algae, Part I. *Tuatara* **13** : 90-104.
- JUILLET-LECLERC A. & SCHRADER H., 1987. Variations of upwellings intensity during the past 3,000 years. *Nature* **329** (6135) : 146-149.
- KOBAYASHI M. *et al.*, 1993. Novel detection of plankton from lung tissue by enzymatic digestion method. *For. Sci. Intern.* **60** : 81-90.
- KRAUSE F., 1936. Elektronenoptische Aufnahmen von Diatomeen mit magnetischen Elektronenmikroskop. *Z. Phys.* **102** : 417-422.
- KREBS W.N., BRADBURY J.P. & THERIOT E., 1987. Neogene and quaternary lacustrine diatom biochronology, Western USA. *Palaios* **2** : 505-513.
- KUEHLTHAU-SERIEYSSOL K., 1993. Les diatomées des sédiments lacustres d'âge miocène supérieur d'Andance et Rochessauve (Ardèche). Thèse doct. Univ. Paris VI, 311 p.
- LABEYRIE L., 1982. Applications paléoclimatiques de la composition isotopique de l'oxygène de la silice des diatomées fossiles : applications à l'évolution de la structure hydrologique superficielle de l'océan austral au cours des derniers 130 000 ans. *Cryptogamie Algologie* **3** (4) : 342.
- LAFONT M., COSTE M., WASSON J.G. & FAESSEL B., 1988. Comparaison de quatre indices biologiques pour apprécier l'impact de la pollution dans des cours d'eau français. *Naturaliste Can. (Rev. Ecol. Syst.)* **115** : 77-87.
- LANGE-BERTALOT H., 1979. Pollution tolerance of diatoms as a criterion for water quality estimation. (In Simonsen R. (ed.) *Proceed. fifth Symp. on Recent and Fossil Diatoms*, Antwerp, September 3-8, 1978). *Nova Hedw. Beih.* **64** : 285-304.
- LARGEAU C. *et al.*, 1980. Sites of accumulation and composition of hydrocarbons in *Botryococcus braunii*. *Phytochemistry* **19** : 1043-1051.
- LECOINTE C., COSTE C. & PRYGIEL J., 1993. « OMNIDIA » software for taxonomy, calculation of dia-

- tom indices and inventories management. *Hydrobiologia* **269/270** : 509-513.
- LEVRING T., HOPPE H.A. & SCHMIDT O.J., 1969. Marine algae. A survey of research and utilization. *Botanica Marina Handbooks* Vol. 1, Cram, De Gruyter & co., Hamburg, 421 p.
- LEWIS R.C., 1929. The food habits of the California sardine in relation to the seasonal distribution of microplakton. *Bull. Scripps. Inst. Oceanogr.* **2** : 155-180 (cité par Binet, 1988, article non consulté).
- LHOTSKY O. & MARVAN P., 1991. The use of algae as bioindicators. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* **24** : 2122-2124.
- LITTLE B. *et al.*, 1991. Impact of biofouling on the electrochemical behaviour of 304 stainless steel in natural seawater. *Biofouling* **3** : 45-59.
- LUDES B., QUANTIN S., COSTE M. & MANGIN P., 1994. Application of a simple enzymatic digestion method for diatom detection in the diagnosis of drowning in putrified corpses by diatom analysis. *Int. J. Leg. Med.* **107** : 37-41.
- LUNDHOLM N., SKOV J., POCKLINGTON R. & MOESTRUP -, 1994. Domoic acid, the toxic amino acid responsible for amnesic shellfish poisoning, now in *Pseudonitzschia seriata* (Bacillariophyceae) in Europe. *Phycologia* **33** (6) : 475-478.
- MABEAU S., 1989. La « filière algue française » en 1988 : atouts et points de blocage (Harvesting and treatment of seaweed in France). *Oceanis*, **1** (5) : 673-692.
- MAHL H., 1939. Diatomeen aufnahmen mit dem elektrischen Übermikroskop. *Naturwiss.* **27** : 417 p.
- MANN A., 1905. Diatoms, jewels of the plant-world. *Smithsonian Miscellaneous Collections* **48** : 50-58.
- MATSUMOTO H. & FUKUI Y., 1993. A simple method for diatom detection in drowning. *For. Sci. Intern.* **60** : 91-95.
- MUNDA I.M., 1993. Changes and degradation of seaweeds stands in the Northern Adriatic. In : Chapman A.R.O., Brown M.T., Lahaye M (eds.), 14 Int. Seaweed Symp., Brest (France), 16-21 August 1992, *Hydrobiologia* **260-261** : 239-253.
- NEUVILLE D., 1978. Les diatomées des claires ostréicoles, contribution des techniques de culture in vitro à l'étude de leur biologie. Thèse doct. Univ. Poitiers, 279 p.
- NIELAND H., 1980. Die Nahrung von Sardinien, Sardinellen und Maifischen vor der Westküste Afrikas. Berichte aus dem Inst. für Meereskunde. Univ. Kiel **75**, 137 p. (cité par Binet, 1988, article non consulté).
- PATRICK R. & HENDRICKSON J., 1993. Factors to consider in interpreting diatom change. *Nov Hedw., Beih.* **106** : 361-377.
- PATRICK R. & PALAVAGE D.M., 1994. The Value of Species as Indicators of Water Quality. *Proc. Acad. Nat. Sci. Philadelphia* **145** : 55-92.
- PEABODY A.J., 1980. Diatoms and Drowning - A Review. *Med. Sci. Law* **20** (4) : 254-261.
- PESANDO D., 1990 (a). Combination of separation technologies for the isolation of a high molecular weight ionic polysaccharide from a marine diatom in culture *Chaetoceros lauderi*. V^e World Filtration Congress, Nice, juin 1990.
- PESANDO D., 1990 (b). Antibacterial and antifungal activities of marine algae. In : Akatsuka I. (eds.), Introduction to applied Phycology : 3-26.
- PESANDO D. *et al.*, 1979-1980. Isolement, étude structurale et propriétés antibiotiques et antifongiques d'un composant polysaccharidique de la diatomée marine *Chaetoceros lauderi* (Ralfs cc). *Océanis* **5** (Hors-série) : 561-568.
- PICHON J.J. *et al.*, 1992. Surface water temperature changes in the high latitudes of the Southern hemisphere over the last glacial-interglacial cycle. *Paleoceanography* **7** : 289-312.
- PICHON J.J. *et al.*, 1987. A transfer function to estimate past sea surface conditions from core top distribution of marine diatom assemblages in Atlantic and W Indian sectors of Southern Ocean. *Paleogeogr., Paleoclimat., Paleoecol.*, **61** : 79-95.
- PREBUS A. & HILLIER J., 1939. The construction of a magnetic electron microscope of high resolving power. *Can. J. Res. A* **17** : 49-63.
- PRITCHARD P.H. *et al.*, 1992. Oil spill bioremediation : experiences, lessons and results from the Exxon Valdez oil spill in Alaska. *Biodegradation* **3** (2/3) : 315-335.
- PRYGIEL J., 1991. Utilisation des diatomées benthiques pour le suivi de la qualité hydrobiologique des cours d'eau du Bassin Artois-Picardie. Actes 11^e Coll. Diatomistes de Langue Française, Douai, 24-27 septembre 1991 : 93-111.
- RANSON G., 1927. Observations sur *Navicula ostrearia* Bory, origine du verdissement des huîtres. *Rev. algologique* **3** : 26-54.
- RICARD M., 1987. Atlas du phytoplancton marin. II. Diatomophycées. Ed. du C.N.R.S., Paris : 297 p.
- ROBERT J.-M., 1983. Fertilité des eaux des claires ostréicoles et verdissement : utilisation de l'azote par les diatomées dominantes. Thèse doct. état Univ. Nantes, 281 p. + un volume d'annexes.
- ROBERT J.-M., AMIARD J.-C. & BAUD J.-P., 1992. Une nouvelle eau de mer mise à la disposition de l'aquaculture en Baie de Bourgneuf : l'eau souterraine salée. Communication orale, U.O.F., 24 septembre, Paris.
- ROBERT J.-M. & TURPIN V., 1993. La marennine synthétisée par la diatomée *Haslea ostrearia* Simonsen : est-elle toxique pour l'algue ? Premiers résultats. Communication présentée aux Journées de Travail de la Société Phycologique de France (4-5 février 1993). *Crypt. Algal.* **14** (2-3) : 89 (1 p.).
- ROUND F.E., 1991. Diatoms in river water-monitoring studies. *J. Appl. Phycol.* **3** : 129-145.
- ROUND F.E. & CRAWFORD R.M., 1981. The lines of evolution in the Bacillariophyta. I. Origin. *Proc. Roy. Soc. Lond. B.* **211** : 237-260.
- ROUND F.E. & CRAWFORD R.M., 1990. 31. Phylum Bacillariophyta. In : Margulis L., Corliss J.O., Melkonian M., Chapman D.J. (eds.) & McKhann H.I. (editorial coordinator), *Handb. protocista*. Jones & Bartlett Publ., Boston : 574-596.

- ROUX M., SERVANT-VILDARY S. & SERVANT M., 1991. Inferred ionic composition and salinity of Bolivian Quaternary lake, as estimated from fossil diatoms in the sediments. *Hydrobiologia* **210** : 3-18.
- RUMEAU A. & COSTE M., 1988. Initiation à la systématique des diatomées d'eau douce. Pour l'utilisation pratique d'un indice diatomique générique. *Bull. Fr. Pêche Piscic.* **309** : 1-69.
- SAUVAGEAU E., 1920. Utilisation des algues marines. Doin éd., Paris, 394 p.
- SCHRADER H., 1992. Peruvian coastal primary paleo-productivity during the last 200,000 years. In : Summerhayes C.P., Prell W.L., Emeis K.C. (eds.), *Upwellings Systems: Evolution Since the Early Miocene* : 391-409.
- SEITZ B., GAUCHER P. & REVERDY C., 1982. A propos d'un cas de silicose chez un employé de teinturerie pressing. Communication à la Société de Médecine et d'hygiène du travail; séance du 11 janvier 1982; *Arch. Maladies professionnelles* : 477-478.
- SERVANT-VILDARY S. & ROUX M., 1990a. Variations de température estimées à partir du déplacement en altitude des associations de diatomées dans une séquence holocène de la Cordillère Orientale de Bolivie. *C.R. Acad. Sci. Paris* **311** (2) : 429-436.
- SERVANT-VILDARY S. & ROUX M., 1990b. Multivariate analysis of diatoms and water chemistry in Bolivian saline lakes. *Hydrobiologia* **197** : 267-290.
- SHUBERT L.E. (ed.), 1984. *Algae as ecological indicators*. Academic Press, London, Orlando, San Diego, New York, Toronto, Montreal, Sydney, Tokyo, 434 p.
- SMOL J.P., 1988. Paleoclimate proxy data from freshwater arctic diatoms. *Verh. Int. Verein. Limnol.* **23** : 837-844.
- SULLIVAN T.J. *et al.*, 1990. Quantification of changes in lakewater chemistry in response to acidic deposition. *Nature* **345** : 54-58.
- TAYLOR F.B., 1929. Notes on Diatoms. Guardian Press, Bournemouth, 269 p.
- TER BRAAK C.J.F. & VAN DAM H., 1989. Inferring pH from diatoms: a comparison of old and new calibration methods. *Hydrobiologia* **178** : 209-223.
- VAN DEN BROECK J., 1960. La diatomite (Kieselgur). Les diatomées et leurs emplois dans l'industrie, 3^e édition, Paris, 207 p.
- VAN HEURCK H., 1880-1881. Synopsis des diatomées de Belgique, Atlas, Anvers, 6 p. + 132 planches.
- VISO A.C., PESANDO D. & BABY C., 1987. Antibacteria and Antifungal Properties of some Marine Diatoms in Culture. *Botanica Marina* **30** (1) : 41-45.
- VIZINET J., 1993. Utilisations des diatomées. Mém. Maîtrise B.O.P., Univ. Paris VI, Mus. Nat. Hist. Nat., 30 p.
- VOLESKY B., ZAJIC J.E. & KNETTING E., 1970. Algal products. In : Zajic J.E. (ed.), *Properties and products of algae*. Proc. Symp. Culture of Algae Sponsored by Divis. Microb. Chem. Technol. Amer. Chem. Soc., New York City, Sept. 1969, Plenum Press, New York, London : 49-82.
- WHITMORE T.J., 1989. Florida diatom assemblages as indicators of trophic states and pH. *Limnol. Oceanogr.* **34** : 882-895.
- ZAJIC J.E., 1970. Properties and products of algae. Proc. of the Symp. on the Culture of Algae Sponsored by Div. Microb. Chem. Technol. Amer. Chem. Soc., New York City, Sept. 1969, Plenum Press, New York, London, x + 154 p.
- ZANEVELD J.S., 1959. The utilization of marine algae in tropical south and east Asia. *Eco. Bot.* **13** : 89-131.

Reçu le 17 octobre 1994; received October 17, 1994

Accepté le 13 décembre 1994; accepted December 13, 1994

ESSAI DE TYPOLOGIE DES PEUPELEMENTS DIATOMIQUES DES SOURCES (TABLE RONDE)

A trial of a typology of Diatom assemblages of springs

A. CAZAUBON¹, T. ROLLAND¹

¹Laboratoire d'Ecologie des Eaux continentales Méditerranéennes, Université Aix-Marseille 3,
13397 Marseille Cédex 13, France

TYPOLOGIE
DIATOMEES
SOURCES

RÉSUMÉ – Les limnologues ont publié, au cours de ce siècle, de nombreux travaux sur la zonation des cours d'eau ce qui a donné naissance à plusieurs typologies basées sur la physiographie de différents organismes vivants appartenant, le plus souvent, au règne animal (les invertébrés et les Poissons, plus particulièrement). Ce thème de réflexion, à partir d'une synthèse bibliographique des travaux algologiques traitant des sources, devrait permettre de définir d'éventuelles associations caractéristiques de ce biotope et, par analogie avec les travaux des zoologistes, de mettre en évidence une typologie des sources basée sur les Diatomées. Une des raisons principales de ce choix repose sur le fait que les sources constituent un biotope particulièrement intéressant du fait de leur situation à l'interface des eaux souterraines et des eaux superficielles. De plus, les sources se caractérisent par une certaine stabilité aux plans thermique et chimique, avec des variations journalières et annuelles relativement faibles ainsi que par un débit assez constant et peu dépendant, à brève échéance, du volume des précipitations du fait de l'origine souterraine des eaux. Enfin, cette première manifestation épigée des réseaux hydrographiques représente, de ce fait même, un niveau initial référentiel pour un réseau hydrographique donné.

I. DIFFÉRENTES DÉFINITIONS DES SOURCES

Si l'on se réfère aux définitions littérales, on trouve, à titre d'exemples :

– dans le dictionnaire Robert :

« **Source** surs(). n.f. (1530; source, XII e; fem. de so(u)rs, a.p.p. de sourdre)

1° Eau qui sort de terre; issue naturelle ou artificielle par laquelle une eau souterraine se déverse à la surface du sol. V. Fontaine, point (d'eau). Source permanente ou intermittente. Source thermale. Capter une source. Eau de source. »

« **Soucier, IERE** (sursje, jère), n. (1781; de source). Personne à laquelle on attribue l'art de découvrir les sources cachées, les nappes souterraines (au moyen d'une baguette, d'un pendule etc.) ».

– dans le Petit Larousse :

« **Source** : n.f. (ed sours, p. passé de sourdre).

1° Point d'émergence à la surface du sol de l'eau emmagasinée à l'intérieur (l'eau d'infiltration revient au jour sous forme de source lorsque la couche imperméable sur laquelle elle coule affleure à l'air libre, à flanc de côteau par ex.) ».

D'un point de vue géologique, on sait que les eaux souterraines de la lithosphère circulent ou stagnent dans les fissures et dans les pores des roches.

Les eaux peuvent avoir une origine exogène ou endogène. Il existe ainsi des eaux

– dites juvéniles (ou magmatiques) qui proviennent de la condensation des vapeurs de dégazéification des magmas profonds

– dites fossiles (ou de gisement) enfouies sous terre depuis des millénaires, stockées dans des sédiments géologiques meubles

- thermales ou minérales, provenant d'eaux qui ont voyagé profondément sous terre

- eaux vadoses ou eaux d'infiltration provenant des précipitations atmosphériques récentes.

Les géographes définissent quelques types de sources :

- les sources de trop plein sortant d'une roche perméable ou au contact d'un niveau imperméable quand la nappe est saturée (tarissent avec la sécheresse)

- les sources d'émergence qui sont alignées le long d'un horizon étanche surmonté d'une roche magasin. Elles naissent souvent à partir de nappes artésiennes, sont fréquentes et ne se tarissent que rarement.

- les sources vauclusiennes correspondant à la résurgence d'une rivière souterraine; très régulières, leur débit est fort.

Par extension et en référence aux définitions littérales citées plus haut, on peut y adjoindre, d'autres types de sources comme :

- les sources noyées (dans un lac ou un cours d'eau)

- les fontaines et puits

- les suintements (organismes madicoles)

- les sources-tourbières

- les névés

- les laurons (lauroun signifie surgen d'eau), puits naturels, en forme de tronc de cône, ouverts sur la nappe phréatique laissant jaillir une eau claire et limpide qui se répand le plus souvent dans des marais

- les khattaras, drains anthropogènes de l'horizon superficiel de la nappe phréatique (époque almoravide du X^e et XI^e siècle, Maroc).

D'un point de vue écologique, le concept de classification des eaux courantes a amené certains auteurs à distinguer, d'après la présence de tel ou tel invertébré, un certain nombre de ruisseaux; ainsi Thienemann (1936) fut le premier à distinguer, à partir de la présence de tel ou tel Chironomide, différents types de ruisselets. Beyer en 1932 établit une liste de 11 types de sources et 8 types de ruisseaux, mais ce travail a été contesté par Illies en 1952 car il ne peut leur attribuer des formes caractéristiques.

D'après Botosaneanu (1988) qui fait référence aux travaux antérieurs de Illies et Botosaneanu (1963) sur la zonation écologique, il existe 3 zones peuplées d'isocénoses universellement variables dans les eaux courantes, caractérisées par

- l'amplitude des variations thermiques

- le débit dont la brusque et considérable modification, surtout au niveau des confluent principaux, représente un facteur important dans la

zonation (variations du complexe de facteurs abiotiques)

- la vitesse du courant

- la nature et la structure du substrat dans leur aspect dynamique,

- les particularités écophysologiques des espèces et les groupes d'animaux composant leurs peuplements.

Ce sont successivement de l'amont vers l'aval, le crénal, le rhithral et le potamal. Chaque zone est subdivisée en 2, le secteur des sources étant composé des zones 1 et 2, définies ci-après :

la ZONE 1 est représentée par les sources (très variées, nécessitant leur propre classification)

la ZONE 2 : par les ruisselets des sources

la ZONE 3 par les ruisselets résultant généralement de la confluence de 2 ou plusieurs ruisselets de sources

la ZONE 4 par les ruisselets résultant généralement de la confluence de 2 ou de plusieurs ruisselets de la zone 3

la ZONE 5 par les rivières de montagne ou de région de prémontagne provenant de la confluence de deux grands ruisseaux au moins

la ZONE 6 par le cours moyen et inférieur de rivières qui correspondent dans leur cours supérieur à la zone 5.

D'après Illies et Botosaneanu (1963), les groupes écologiques formant la mosaïque des sources sont des formes souterraines, crénobiontes, crénophiles, la faune madicole, les formes aériennes non hygrophiles, celles hygrophiles, les formes rhéophiles, lénitophiles et eurytopes.

Dans son étude des cours d'eau de Corse, Giudicelli (1968), après avoir défini 6 groupes d'espèces d'invertébrés (les rhéophiles strictes, les rhéophiles préférantes, les lénitophiles préférantes, les lénitophiles, les eurytopes, les madicoles), distingue 4 groupements écologiques ou synusies :

- synusie des cascadelles (forte pente, petites cascades sur les éboulis pierreux des moraines glaciaires)

- synusie pétricole : des courants modérés avec des espèces pétricoles

- synusie des courants lents : sur substrats de sable ou de graviers; la lame d'eau ne dépasse pas 5 cm et s'écoule sans remous; la vitesse du courant est inférieure à 40 cm.s⁻¹. Ce sont des formes lénitophiles et pétricoles liées à la présence de quelques pierres isolées posées sur le fond de sable et partiellement émergées

- synusie des portions calmes : fond vaseux recouvert par une accumulation d'écorces et d'aiguilles de pin. La lame d'eau a une épaisseur supérieure à 10 cm. Le biotope est généralement

rencontré au niveau de l'élargissement d'un émissaire. L'eau paraît immobile.

II. LES ALGUES DES SOURCES

Comme cela a été maintes fois souligné dans la littérature, la richesse taxonomique des peuplements d'algues récoltés dans un biotope dépend, en grande partie, du nombre d'investigations spatiales et temporelles réalisées. En règle générale, on trouve des valeurs densitaires faibles pour le périphyton comme pour le phytoplancton et cette florule algale semble également se caractériser par une richesse taxonomique réduite.

A. Variations interbiotiques

Les différents types de sources énoncés plus haut ont fait l'objet de prospections algologiques, mais il est évident que certaines d'entre elles, du fait de leur accessibilité ont été privilégiées. Ainsi les sources de plaine, et plus spécialement les sources karstiques ont été plus souvent visitées et étudiées que les sources de montagne.

Nous n'avons pu nous procurer des inventaires de sources magmatiques de notre région ou faire nous-mêmes des investigations sur celles-ci, du fait de leur faible représentation. Il en va de même avec les sources thermales dont l'accès est rendu difficile avec l'industrialisation et la privatisation de celles-ci.

Les suintements représentent, en revanche des gîtes bien étudiés. Nous citerons les travaux de Vaillant (1955) qui distingue un habitat madicole, unité écologique bien délimitée, caractérisée par l'écoulement d'une lame d'eau dont l'épaisseur est inférieure à 2 mm. Il se distingue d'un habitat fluicole dans lequel la lame d'eau a une épaisseur supérieure à 2 mm. Dans un gîte madicole la nature du substrat géologique n'intervient qu'au second plan. L'étude de 74 gîtes verticaux situés sur les terrains les plus variés d'origine sédimentaire, volcanique et cristalline répartis depuis les glaciers des Alpes jusqu'au Sahara Central permet de recenser 330 taxons mais n'aboutit pas à la détermination d'associations crénophiles. La majorité des algues répertoriées sont ubiquistes, aquatiques ou aérophiles. La nature de l'eau qui arrose l'habitat influence la colonisation algale (eau incrustante ou non) ainsi que le débit qui détermine l'installation de mousses et d'hépatiques qui jouent, dans un premier temps, le rôle de barrière aux débris minéraux et organiques; ceux-ci filtrent l'eau et forment une barrière derrière laquelle les organismes auront du mal à s'installer.

Nos recherches sur des suintements situés à proximité du torrent de Crévoux (Alpes) montrent que la florule qui se développe directement sur le substrat géologique est pauvre au plan taxonomique. Les espèces constitutives de ce peuplement sont des taxons signalés comme saprophiles (*Navicula saprophila*, *N. permitis*) ou méso- à polysaprobies (*Gomphonema parvulum*, *N. subminuscula*).

En ce qui concerne les sources karstiques, une synthèse de nos résultats portant sur des prospections régulières dans l'année d'une trentaine de ces biotopes, nous a conduit à prendre en compte, en plus des paramètres physico-chimiques classiques, des données environnementales, encore peu utilisées pour étudier les autres secteurs des réseaux hydrographiques concernés.

Ainsi, nous avons intégré dans une étude de 6 sources vauclusiennes du sud-est de la France, l'altitude du point culminant du bassin versant de la source et le mode d'occupation du bassin versant (agriculture, pâturage, station de ski, forêts...). Ceci a permis de montrer que la qualité des eaux des exurgences est aussi sous la dépendance de tels facteurs. Les associations algales répondent tout autant à la forte minéralisation naturelle des eaux par la présence d'espèces pouvant supporter une salinité élevée (*Caloneis amphisbaena*, *Pleurosira laevis*, *Amphiprora alata*) ou calciphiles (*Rhoicosphenia abbreviata*, *Nitzschia dissipata* ou *Cymatopleura solea*), qu'à d'éventuelles pollutions diffuses du bassin versant situées bien en amont de la source. Ce phénomène se traduit par la prolifération de formes polluo-tolérantes et méso- ou polysaprobies dont la présence dans le secteur initial d'un cours d'eau peut paraître, à priori, surprenante. De la même manière, le cheminement des eaux endogées depuis un sommet élevé (altitude dépassant 1800 mètres) permet d'expliquer la présence, dans des sources de basse altitude (entre 300 et 500 m), d'algues thermophiles froides, comme *Hydrurus foetidus* et *Fragilaria arcus*.

D'une manière générale, il faut noter que certains facteurs apparaissent comme prédominants, agissant conjointement dans le déterminisme des communautés algales des sources; ce sont :

- le débit, la température, la nature du substrat, les caractéristiques du bassin versant.

Dans le sud-est de la France, il nous paraît difficile de définir un peuplement des sources et, peut-être même, de retenir l'association algale *Hydrurus-Ceratoneis-Hildenbrandia* comme inféodée aux seules sources.

On peut cependant remarquer la quasi-omniprésence dans nos inventaires d'*Achnanthes minutissima*, *Cocconeis placentula*, *C. pediculus*, *Cymbella minuta*, *Eunotia*, *Gomphonema parvulum*, *Diatoma vulgare*. Mais il paraît difficile de

qualifier cette association, de crénophile, (bien qu'elle soit fréquemment mentionnée en littérature), compte tenu du fait qu'on ne peut que constater qu'il s'agit d'espèces assez euryèces et que ces assemblages se développent aussi dans d'autres secteurs des rivières.

B. Variations intrabiotopiques

Très fréquemment, la composition taxonomique et la densité de la florule algale varient d'un point à l'autre, au sein d'une même station.

Cette variation intrabiotopique a pu être rattachée à la nature des différents substrats présents dans un même gîte; ainsi, il peut être rapporté, à titre d'exemple, les résultats d'une investigation menée dans une source karstique du sud-est de la France (l'Argens, Var); la récolte simultanée des algues sur 4 types différents de substrats contigus (sable, caillou, végétal, substrat artificiel) a conduit à mettre en évidence de profondes différences dans la composition (richesse taxonomique variant de 8 à 28, selon l'habitat pris en compte) et la densité cellulaire du peuplement (de 31 à 25275 cellules.cm⁻²); les cailloux du lit ont représenté dans ce cas, le support de la communauté la plus diversifiée; le sable, en revanche, héberge le peuplement algal le plus pauvre (Cazaubon, 1988).

Mais ces résultats ne peuvent être généralisés, car différentes entités biologiques apparaissent pour un même type de substrat. Ainsi, si l'on se réfère aux macrophytes aquatiques, on peut noter des variations de peuplements épiphytes, en général, et de Diatomées, en particulier, selon le végétal hôte considéré; cette hétérogénéité a été mise en évidence pour des Bryophytes, Angiospermes, macroalgues filamenteuses ou encroûtantes se développant, côte à côte, dans une même source (Cazaubon, 1989).

De même, Vaillant distingue au sein de l'habitat madicole des biotopes pétrimadicoles, limimadicoles et bryomadicoles.

Ces spécificités liées au substrat sont confirmées par Iserentant (1988) qui montre que le peuplement diatomique, dominé par *Cymbella*, d'un travertin de pente (cron) en Lorraine belge, est difficilement rapportable aux peuplements signalés dans d'autres milieux calcaires, si ce n'est aux assemblages de certains groupements fontinaux de montagne (Ector & Iserentant, 1988). Ces deux auteurs définissent pour le même *Cratoneuron* des variantes d'assemblages ce qui renforcerait la variabilité de ces communautés.

Il existe même des variations de ces communautés diatomiques au sein d'un même végétal (synusies?) selon la partie de l'appareil végétatif

de l'hôte à laquelle on s'intéresse (Cazaubon, 1989).

La perception des sources au travers des peuplements diatomiques est, à notre sens, encore plus morcelée que celle proposée pour les invertébrés; ainsi une prospection de la source de la Guisane, nous permet de distinguer, dans une aire réduite correspondant à la zone 1 des sources de Botosaneanu, depuis le névé (2100m) jusqu'au ruisseau des sources (distance: 8m), 4 communautés diatomiques différentes avec des variations de la richesse taxonomique allant de 6 à 19 (amont-aval).

Sabater & Roca (1992) et Roca (1990), qui ont analysé les communautés diatomiques de 207 sources des Pyrénées Centrales, corrélerent les sources qu'ils classent en 5 types, à la lithologie des aires étudiées. Ils signalent une analogie entre, d'une part, les espèces des eaux peu minéralisées et les espèces boréales, d'autre part, toutes les Diatomées des sources calcaires et celles de tous les milieux calcaires tempérés.

CONCLUSION

Ces résultats tendent à montrer qu'il est encore difficile (ou peut-être prématuré, en l'état actuel de nos connaissances sur les Algues des sources) de définir des associations référencielles de Diatomées crénophiles.

Nous serions tentés de dire que la grande réactivité des Algues aux variations du milieu, est susceptible d'engendrer autant d'associations que de types géographiques, géologiques, physico-chimiques et biologiques de sources.

BIBLIOGRAPHIE

- BEYER H., 1932. Die Tierwelt der Bäche und Quellen des Baumbergegebietes. *Abh. Westf. Prov. Mus. Naturkd.* **3**: 1-185.
- BOTOSANEANU L., 1979. Quinze années de recherches sur la zonation des cours d'eau: 1963-1978. *Bijdrag. Dierk.* **49** (1): 109-134.
- CAZAUBON A., 1988. The significance of a sample in a natural lotic ecosystem: Microdistributions of Diatoms in the karstic Argens spring, South-East, France. In Ricard: Ouvrage à la mémoire du Professeur Germain: 513-519.
- CAZAUBON A., 1989. La florule épiphyte principalement diatomique de diverses plantes-hôtes à la source d'une rivière méditerranéenne (l'Argens, sud-est de la France). *Cryptogamie-Algologie* **10** (3): 195-207.

- DUSSART B., 1992. Limnologie-l'étude des eaux continentales. Boubée : 681 p.
- ECTOR L. et R. ISERENTANT, 1988. Les Diatomées des groupements fontinaux du Val de Bagnes (Valais Suisse). *Mém. Soc. Roy. Bot. Belg.* **10** : 12-16.
- GIUDICELLI J., 1968. Recherches sur le peuplement, l'écologie et la biogéographie d'un réseau hydrographique de la Corse Centrale. Thèse Etat Sc. Nat., Univ. Aix-Marseille : 437 p.
- ILLIES J., 1952. Die Mölle Faunistisch.ökologische Untersuchungen an einem Forellensbach im Lipper Bergland. *Arch. Hydrobiol.* **46** : 424-612.
- ILLIES J. et L. BOTOSANEANU, 1963. Problèmes et méthodes de la classification et de la zonation écologique des eaux courantes considérées du point de vue faunistique. *Mitt. internat. Verein. Limnol.* **12** : 1-57.
- ISERENTANT R., 1988. Les Diatomées d'un traversin de pente («cra» en Lorraine Belge). *Mém. Soc. Roy. Bot. Belg.* **10** : 17-25.
- ROCA J.R., 1990. Ecological and biogeographical Aspects of Diatom Distribution in Pyrenean Springs. *Brit. Phycol. J.* **27** : 203-213
- SABATER S. et J.R. ROCA, 1992. Physical and chemical typology of springs in the Central Pyrenes : a regional synthesis. *Limnetica* **6** : 57-58.
- THIENEMANN A., 1936. Alpine Chironomiden. *Arch. Hydrobiol.* **30** : 167-262.
- VAILLANT T., 1955. Recherches sur la faune madicole de France et de Corse et d'Afrique du Nord. Thèse Dr. Etat Sc. Nat. Univ. de Paris : 252 p.

Reçu le 26 janvier 1995; received January 26, 1995
Accepté le 21 février 1995; accepted February 21, 1995

CROISSANCE DES DIATOMÉES EN LABORATOIRE ET MÉTHODOLOGIES (TABLE RONDE)

Laboratory culture methods for growth of diatoms (round table)

P. MARSOT

Institut National de la Recherche Scientifique, 310 Allée des Ursulines, Rimouski, Québec, G5L 3A1, Canada

CULTURES CONTINUES
CONFINÉES
DIALYSE
DIATOMÉES
TECHNIQUES

RÉSUMÉ – Cette synthèse de table ronde décrit brièvement les principaux modes de culture utilisés en laboratoire pour la croissance de Diatomées planctoniques. La discussion porte d'abord sur la production en grand volume de Diatomées (20 à 400 L) en vue d'applications en aquaculture et en recherches biotechnologiques sur la valorisation des composés bioactifs. Les méthodes de culture destinées aux études physiologiques et écophysiologiques (cultures confinées, continues et à dialyse) sont également décrites et on y discute de leur fonctionnement et de leur limite d'utilisation.

DIATOMS
CULTURE
TECHNIQUES
CONTINUOUS CULTURES
BATCH CULTURES
DIALYSIS CULTURES

ABSTRACT – This synthesis briefly describes usual culture techniques for growth of planktonic diatoms in laboratory. This discussion deals firstly with mass cultivation of diatoms (20 to 400 L) and its applications in aquaculture and for biotechnological researches concerning the identification of high-value bioactive compounds. The use and experimental limits of several culture systems for physiological and ecological studies of diatoms (batch, continuous and dialysis cultures) are also discussed.

Le développement et l'amélioration des méthodes de culture de Diatomées en laboratoire visent deux objectifs principaux :

1. la production d'une biomasse algale destinée à des recherches sur l'identification de composés bioactifs (produits à haute valeur ajoutée) et à certains élevages aquicoles,
2. les études physiologiques et écophysiologiques des Diatomées.

1. PRODUCTION D'UNE BIOMASSE ALGALE (CULTURES INTENSIVES EN LABORATOIRE)

La valorisation industrielle de produits d'origine algale fait l'objet de plusieurs recherches (Burlaw, 1953; Shelef et Soeder, 1980; Borowitzka et Borowitzka, 1988). Les microalgues, y compris les Diatomées, sont considérées comme une nouvelle source de composés chimiques fins

ou biologiquement actifs. Les chances de découvrir de nouveaux composés chez ces micro-organismes, encore peu connus, sont élevées (Patterson *et al.*, 1991). Certains de ces produits peuvent connaître des applications intéressantes en industries pharmaceutique, agro-alimentaire et chimique, par exemple : les antibiotiques, les vitamines (B 12), les enzymes, les molécules marquées, les acides aminés, les acides gras. Dans ce secteur de recherche, les Chlorophycées et les Cyanophycées ont reçu beaucoup plus d'attention que les Diatomées. Toutefois, certains composés bioactifs, potentiellement applicables à l'industrie, ont été identifiés chez les Diatomées. Ainsi, des activités antibactériennes d'extraits lipidiques de *Chaetoceros lauderi*, *Skeletonema costatum*, *Asterionella japonica* ont été mises en évidence (Duff *et al.*, 1966; Pesando, 1972; Aubert *et al.*, 1979). Par ailleurs, Cooper et coll. (1983) ont isolé à partir d'extraits hydrophiliques de *Phaeodactylum tricorutum* et *Skeletonema costatum*, des antibiotiques efficaces contre certaines bactéries marines et terrigènes gram-négatif.

L'enzyme chlorophyllase des Diatomées, beaucoup plus active que celle des plantes terrestres (Barrett et Jeffrey, 1964), pourrait être utilisée en industrie agro-alimentaire comme agent décolorant d'huiles végétales contaminées par la chlorophylle exogène (Khamessan *et al.*, 1993).

Aspect économique

Malgré ces perspectives intéressantes, la valorisation biotechnologique des métabolites algaux a connu très peu d'applications industrielles. On attribue ce retard à deux principales causes : premièrement, au coût de production élevé de la biomasse algale relié à des problèmes techniques touchant l'efficacité des méthodes de culture et de récolte des microalgues. Le coût de production varie selon les espèces et les techniques entre 0,4 US\$/kg (en étang) et 25 à 68 US\$/kg (en raceways et réservoir). La faible prolificité des micro-organismes photosynthétiques, en comparaison avec les bactéries, contribue également à l'augmentation des coûts de production ; deuxièmement, à la recherche déficiente due au manque de soutien financier pour cet aspect de l'algologie.

Discussions sur les perspectives de recherche et l'approche expérimentale

Considérant les contraintes économiques et biologiques d'une production à grande échelle, l'effort de recherche devrait d'abord porter vers l'identification et la purification de nouveaux composés spécifiques aux microalgues afin de créer des points d'intérêt. Ce groupe de micro-organismes a très peu fait l'objet d'investigations. En fait, les études ont porté sur moins de 1% de toutes les espèces de microalgues connues. Dans ce contexte, les étapes proposées sont les suivantes :

- isolement de souches candidates. Répertoire les Diatomées provenant de différents milieux, les identifier et préparer des cultures de routine. Cette démarche expérimentale a été faite chez les Cyanophycées et, parmi plus de 1000 espèces répertoriées, l'on a découvert de nouveaux antibiotiques dont plusieurs agents anticancérigènes (Patterson *et al.*, 1991).

- développer pour l'espèce cible des cultures semi-volumineuses intensives (20 à 400 L), de façon à obtenir suffisamment de biomasse pour procéder à l'extraction et à la purification du produit. Le rendement des cultures semi-volumineuses de Diatomées en laboratoire peut être accru en améliorant les conditions d'éclairage (surface et fréquence d'éclairage) et par un enrichissement continu et croissant en nutriments majeurs (Khamessan *et al.*, 1993).

- étudier la biosynthèse du métabolite en relation avec la phase de croissance de l'algue. Par exemple, certains antibiotiques algaux sont synthétisés exclusivement en phase exponentielle, d'autres en phase stationnaire (Cooper *et al.*, 1983).

- récolte des microalgues. Elle peut être accomplie par les techniques de centrifugation continue ou par flocculation (de la Noüe, 1993). La technique de filtration tangentielle s'est avérée efficace et relativement peu coûteuse pour des cultures de Diatomées de 200 L et plus (résultats personnels).

- production industrielle du produit bioactif. Les progrès récents du génie génétique nous suggèrent que la production à grande échelle du métabolite algal pourrait être confiée à des cultures de micro-organismes plus prolifiques (ex : les bactéries hétérotrophes). Le clonage du gène responsable de la biosynthèse d'un métabolite et son expression sur des cellules prokaryotes peut en effet s'avérer une alternative à la production coûteuse des algues à grande échelle. Le transfert de certains gènes entre cellules eukaryotes (forme haploïde) et prokaryotes est maintenant envisagé (Craig *et al.*, 1988).

Biomasse algale en aquaculture

Plusieurs espèces de Diatomées entrent dans la composition de la diète algale d'invertébrés marins élevés en « nurserie », notamment les Mollusques Bivalves, durant leur stade larvaire (De Pauw et Persoone, 1988) et lors de leur maturation sexuelle (Fournier et Marsot, 1995). La majorité des Diatomées cultivées à cette fin sont marines, exemples : *S. costatum*, *Thalassiosira pseudonana*, *Phaeodactylum tricornerutum*, *Chaetoceros gracilis* ou *calcitrans*. Pour les besoins d'une « éclosion-nurserie » de Mollusque ou d'élevage de larves de Crevette, la culture peut s'effectuer en laboratoire (greenhouse), dans des récipients de plusieurs dizaines de litres de capacité. La production phytoplantonique constitue néanmoins une étape laborieuse exigeant beaucoup de temps. La culture monospécifique en laboratoire coûte entre 160 et 200 US\$/kg de matière sèche. Pour réduire le travail relié au nettoyage des bassins et au repiquage des cultures, certains auteurs suggèrent d'automatiser, c'est-à-dire d'opérer en cultures continues (Droop, 1975) ou semi-continues de forte densité cellulaire (observations personnelles). Les cultures populeuses en croissance, semblent offrir une meilleure compétition aux Bactéries, Ciliés ou d'autres types de contaminations qui sont difficiles à éviter en cultures volumineuses. Certaines espèces de Diatomées se prêtent mieux que d'autres à la culture continue ou semi-continue. Par exemple, on peut produire *P. tricornerutum* en bassin de 250 L, plus de deux

mois en semi-continu à une concentration de biomasse de $9 \text{ à } 12 \times 10^9 \text{ cellules.L}^{-1}$ ($0,20 \text{ à } 0,26 \text{ g. matière sèche.L}^{-1}$). D'autres recherches sont nécessaires dans le but d'isoler de nouvelles souches de Diatomées à la fois nutritives et résistantes aux contaminations microbiennes.

2. ÉTUDES PHYSIOLOGIQUES ET ÉCO-PHYSIOLOGIQUES DES DIATOMÉES

Ces études exigent des méthodes de culture permettant un bon contrôle de la croissance de l'algue. Ces méthodes servent à confirmer certaines hypothèses écologiques et à évaluer en laboratoire l'influence de facteurs environnementaux (nutriments, lumière, photopériode, température, polluant, broutage, etc.) sur la croissance des microalgues et la production primaire. La discussion porte sur la description, le fonctionnement et les limites d'utilisation des principales techniques de culture.

Culture confinée

La culture confinée (batch culture), du fait de sa simplicité, est probablement la méthode la plus employée. Le confinement de son milieu détermine une croissance discontinue et un taux de croissance variable comprenant les phases de latence, exponentielle, stationnaire et sénescence. La culture confinée convient mal aux études purement écologiques parce qu'elle impose aux cellules des conditions anormales que l'on ne retrouve pas *in situ*, par exemple :

- milieu environnant limité,
- accumulation extracellulaire (intracellulaire ?) de métabolites,
- emploi de fortes concentrations de nutriments en début de croissance,
- croissance de l'algue limitée par le niveau de concentration des nutriments et non pas par un taux d'approvisionnement des nutriments, comme c'est le cas dans le milieu naturel.

Les études en culture confinée peuvent être abordées de deux façons :

- durant la croissance exponentielle : une période durant laquelle la plupart des algues demeurent dans un état physiologique plus ou moins constant, ainsi que les conditions du milieu,
- en comparant avec des cultures témoins le taux de croissance (μ_e) ou le temps requis pour atteindre le maximum de biomasse. Le taux de croissance est calculé par l'équation : $\mu_e = \ln(X_2/X_1)/t_2-t_1$, X_2 et X_1 représentent la densité cellulaire de la culture aux temps t_2 et t_1 .

Cultures continues

La culture continue (chemostat) est un système ouvert. Le milieu de culture est constamment renouvelé grâce à une arrivée de milieu nutritif neuf (input) et une sortie de culture (récolte = output) s'effectuant aux mêmes débits. En principe, cette méthode nous rapproche davantage des conditions naturelles, dans la mesure où elle nous permet d'obtenir un équilibre dynamique entre l'apport de nutriments et la croissance de l'Algue. L'état d'équilibre d'une culture continue (steady state) est caractérisé par une densité cellulaire stable ($\ln(X_2/X_1) = 0$) et par un taux de croissance néperien (μ_e) égal au taux de dilution (D), d'où l'équation : $\mu_e = \ln(X_2/X_1)/t_2-t_1 + D$. Le taux de dilution D est calculé en divisant le débit journalier du milieu nourricier par le volume de la culture.

Le montage d'un «chemostat» est relativement simple. Il comporte une nourrice reliée à une chambre de croissance et un récipient de récolte accumulant le surplus de la culture. Une pompe péristaltique de précision installée entre la nourrice et la chambre de croissance, permet de fixer le taux de dilution. Dans une culture en «chemostat», le taux de croissance et la densité cellulaire sont prédéterminés par l'ajustement du taux de dilution et de la concentration du nutriment limitant, respectivement. Après quelques générations, lorsqu'un des facteurs de croissance devient limitant, la culture atteint elle-même son équilibre ; la densité cellulaire cesse alors de s'accroître et se stabilise ($\ln X_2/X_1 = 0$).

Le «turbidostat» est une culture continue dont le taux de dilution s'ajuste en fonction de la densité cellulaire de la culture, c'est-à-dire de sa turbidité (Fenaux *et al.*, 1985 ; Hill *et al.*, 1985). La densité cellulaire est donc prédéterminée grâce à un turbidimètre contrôlant la pompe péristaltique, autrement dit le taux de dilution. La cinétique de croissance des algues en «turbidostat» se compare à celle observée en «chemostat» et s'applique à la même théorie. La théorie des cultures continues est traitée en détail dans les ouvrages de Rhee (1980), Droop (1975), Tempest (1969).

Applications de la culture continue

L'influence des facteurs environnementaux est étudiée lorsque la culture atteint son équilibre. Une condition favorable aura l'effet d'accroître la densité cellulaire, la productivité et le taux de croissance (Marsot et Mouhri, 1995), alors qu'une condition défavorable (polluant) provoquera l'effet inverse (Marsot *et al.*, 1995). L'influence des facteurs externes sur le taux d'absorption des nutriments peut également être évaluée en connaissant la concentration des nutriments du milieu nourricier et du milieu de culture.

Cultures à dialyse

La culture à dialyse est également un système ouvert grâce à l'enveloppe dialysante composant en tout (culture en sac à dialyse) ou en partie (culture avec dialyseur autonome) les parois de l'enceinte de croissance. Les échanges des nutriments et des métabolites s'effectuent par diffusion entre le milieu de culture et le milieu externe. Les cultures à dialyse pour microalgues opèrent selon deux modes :

- « continuous reservoir-batch culture »,
- « continuous reservoir-continuous culture ».

Continuous reservoir-batch culture,

tel que défini pour les cultures de bactéries par Schultz et Gerhardt (1969), à cause des réserves illimitées du milieu nutritif (continuous reservoir = milieu naturel) et la croissance discontinue des algues (batch culture). La culture parcourt les phases de croissance latente, exponentielle, linéaire (croissance prolongée typique; Marsot *et al.*, 1992) et stationnaire. Contrairement à la culture confinée, la sénescence des algues n'est pas observée en culture à dialyse à cause d'un apport continu des nutriments et de l'élimination constante des métabolites auto-inhibiteurs (Marsot *et al.*, 1991).

Applications de la culture à dialyse discontinue « continuous reservoir-batch culture »

Ce mode de culture s'applique aux cultures en sacs à dialyse réalisées *in situ* (Berland *et al.*, 1976) ou en laboratoire (Sakshaug et Jensen, 1978) dans le but d'évaluer le potentiel productif (production primaire) d'un milieu naturel, tout en éliminant le facteur broutage par le zooplancton.

Par ailleurs, l'accroissement de la surface de dialyse, par l'emploi d'unités dialysantes à fibres creuses, nous a révélé le fort potentiel productif des Diatomées en milieu naturel (Marsot *et al.*, 1981). Cette forte productivité est attribuée au fait que les algues obtiennent leurs nutriments non seulement de leur propre milieu de culture (concentrations initiales), mais du milieu externe via la dialyse. C'est ainsi qu'au cours de son cycle vital, la culture à dialyse peut bénéficier d'une quantité beaucoup plus grande de nutriments qu'une culture confinée (même enrichie).

« Continuous reservoir-continuous culture »

L'utilisation de dialyseurs autonomes à fibres creuses non biodégradables, installés sur la chambre de croissance nous permet non seulement d'augmenter le rapport surface/volume, mais de réaliser une croissance continue (continuous

culture). Le système opère tel un « turbidostat », en prédéterminant la concentration cellulaire (Marsot *et al.*, 1991). La dilution de la culture s'effectue par ultrafiltration tangentielle du milieu au travers des surfaces dialysantes et le surplus est acheminé vers un récipient de récolte. La culture continue à dialyse reçoit ses nutriments via la dilution et la diffusion. L'apport par diffusion est de loin supérieur à celui obtenu par dilution, ce qui détermine une cinétique de productivité différente des cultures continues en « chemostat » (Marsot et Mouhri, 1995).

Application de la culture à dialyse continue, « continuous reservoir-continuous culture »

La culture à dialyse continue est particulièrement bien appropriée pour des observations à long terme des processus physiologique et morphologique de Diatomées croissant sur un milieu naturel (Marsot et Mouhri, 1995). En exerçant un fort taux de dilution (0,8 à 1,2 d⁻¹), par abaissement de la densité cellulaire, il est possible de maintenir dans la chambre de croissance des conditions trophiques comparables à celles du milieu environnant (Marsot *et al.*, 1991).

CONCLUSIONS

Cette description des principales techniques de culture et leur fonctionnement montre jusqu'à quel point les conditions de croissance des microalgues peuvent différer d'une méthode à l'autre. Ces conditions peuvent déterminer chez une même espèce des comportements physiologiques tout à fait différents et, pour cette raison, nous devons être conscients des particularités et des limites expérimentales des méthodes utilisées avant d'émettre certains principes écologiques. Il convient ici de citer quelques exemples de comportements distincts exprimés par les microalgues en cultures :

- on observe avec l'âge d'une culture confinée une diminution des acides aminés libres intracellulaires (ex : glutamine). En culture dialysante on assiste, au contraire, à un rétablissement des concentrations de ces métabolites responsables de l'assimilation de l'azote (Marsot *et al.*, 1992).

- l'évolution de la morphogenèse de *Phaeodactylum tricorutum* en culture à dialyse continue et en « chemostat » est différente (Marsot et Mouhri, 1995).

- les microalgues montrent une meilleure tolérance aux polluants organiques tels les organoéthers, en milieu ouvert (chemostat) qu'en culture confinée (Saint-Louis *et al.*, 1994).

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT M., M. GAUTHIER, J. AUBERT and P. BERNARD, 1981. Les systèmes d'information des micro-organismes marins. Leur rôle dans l'équilibre biologique océanique. *Rev. Int. Océan. Méd.* 231 p.
- BARRETT J. and S.W. JEFFREY, 1964. Chlorophyllase and formation of an atypical chlorophyllide in marine algae. *Plant. Physiol.* 39 : 44-47.
- BERLAND B.R., D.J. BONIN and S.Y. MAESTRINI, 1976. De l'emploi concomitant d'enceintes dialysantes et de tests biologiques pour la détermination des facteurs nutritionnels limitant la production primaire des eaux marines. *Ann. Inst. Océanogr.* Paris 52 : 45-55.
- BOROWITZKA M.A. and L.J. BOROWITZKA, 1988. Micro-algal biotechnology. Cambridge University Press, Cambridge, 477 p.
- BURLEW J.S., 1953. Algal culture from laboratory to pilot plant. Carnegie Institution of Washington. Pub. 600, Washington, D.C. 357 p.
- COOPER S., A. BATTAT, P. MARSOT and M. SYLVESTRE, 1983. Production of antibacterial activities by two *Bacillariophyceae* grown in dialysis culture. *Can. J. Microbiol.* 29 : 338-341.
- CRAIG R., B.Y. REICHELT and J.L. REICHELT, 1988. Genetic engineering of micro-algae. In Micro-algal biotechnology. Edited by M.A. Borowitzka and L.J. Borowitzka. Cambridge University Press, Cambridge : 415-455.
- DE LA NOUE J. and D. PROULX, 1993. Algal biomass harvest. In Microalgae : from the laboratory to the field. Edited by Joël de la Noüe and G. Laliberté, Workshop, Oct. 17-18, 1993, Départ. Sci. Tech. Aliments, Université Laval, Québec, 33-40.
- DE PAUW N. and G. PERSOONE, 1988. Microalgae for aquaculture. In Micro-algal biotechnology. Edited by M.A. Borowitzka and L.J. Borowitzka, Cambridge University Press, Cambridge : 197-221.
- DROOP M.R., 1975. The chemostat in mariculture. In 10th European Symposium on Marine Biology, Ostend, Belgium, Sept. 17-23, 1 : 71-93.
- DUFF D.C.B., D.L. BRUCE and N.J. ANTIA, 1966. The antibacterial activity of marine planktonic algae. *Can. J. Microbiol.* 12 : 877-884.
- FENAUX R., G. MALARA and H. CLAUSTRE, 1985. A turbidostat driven and controlled by microcomputer. *Aquaculture* 48 : 91-95.
- FOURNIER R. and P. MARSOT, 1995. Reproduction hors-saison du pétoncle géant *Placopecten magellanicus*. Rapport technique. Recherche en partenariat, INRS-MAPAQ, Minist. Agriculture Pêcheries et Alimentation du Québec, 46 p.
- HILL S.H., M.R. ABBOTT and K.L. DENMAN, 1985. A computer-controlled turbidostat for the culture of planktonic algae. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 42 : 744-753.
- KHAMESSAN A., S. KERMASHA and P. MARSOT, 1993. Production and biotechnological applications of chlorophyllase from algal origin. In Microalgae : from the laboratory to the field. Edited by Joël de la Noüe and G. Laliberté. Workshop, Oct. 17-18, 1993. Départ. Sci. Tech. Aliments, Université Laval, Québec : 125-136.
- MARSOT P., A. CEMBELLA and J.C. COLOMBO, 1991. Intracellular and extracellular amino acid pools of the marine diatom *Phaeodactylum tricorutum* (*Bacillariophyceae*) grown on unenriched seawater in high-cell-density dialysis culture. *J. Phycol.* 27 : 478-491.
- MARSOT P., A.D. CEMBELLA and K. MOUHRI, 1992. Croissance de la biomasse azotée de *Phaeodactylum tricorutum* (*Bacillariophyceae*) en cultures discontinues dialysante et non dialysante. *Can. J. Microbiol.* 38 : 945-952.
- MARSOT P., R. FOURNIER and C. BLAIS, 1981. Culture à dialyse : emploi de fibres creuses dialysantes pour la culture massive de phytoplancton. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 38 : 905-911.
- MARSOT P. and K. MOUHRI, 1995. Morphogenèse et croissance de la Diatomée marine *Phaeodactylum tricorutum* en cultures continues dialysante et non dialysante. *Vie Milieu* 45 (3) : 199-205.
- MARSOT P., E. PELLETIER and R. SAINT-LOUIS, 1995. Effects of triphenyltin chloride on growth of the marine microalga *Pavlova lutheri* in continuous culture. *Bull. Env. Cont. Toxicol.* 54 : 389-395.
- PATTERSON G.M.L., C.L. BALDWIN, C.M. BOLIS, F.R. CAPLAN, H. KARUSO, L.K. LARSEN, I.A. LEVINE, R.E. MOORE, C.S. NELSON, K.D. TSCHAPPAT, G.D. TUANG, 1991. Antineoplastic activity of cultured blue-green algae (*Cyanophyta*). *J. Phycol.* 27 : 530-536.
- PESANDO D., 1972. Etude chimique et structurale d'une substance lipidique antibiotique produite par une diatomée marine *Asterionella japonica* (Cleve). *Rev. Int. Océanogr. Méd.* 25 : 49-70.
- RHEE G.Y., 1980. Continuous culture in phytoplankton ecology. In Advances in aquatic microbiology, Edited by M.R. Droop and H.W. Jannasch, Academic Press, London, 2 : 151-203.
- SAINTE-LOUIS R., E. PELLETIER, P. MARSOT and R. FOURNIER, 1994. Distribution and effects of tributyltin chloride and its degradation products on the growth of the marine alga *Pavlova lutheri* in continuous culture. *Water Research* 28 : 2533-2544.
- SAKSHAUG R. and A. JENSEN, 1978. The use of cage cultures in studies of the biochemistry and ecology of marine phytoplankton. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 16 : 81-106.
- SCHULTZ J.S. and P. GERHARDT, 1969. Dialysis culture of micro-organisms : design, theory and results. *Bacteriol. Rev.* 33 : 1-47.
- SHELEF G. and C.J. SOEDER, 1980. Algae biomass. Production and use. Elsevier/North-Holland Biomedical Press, Amsterdam, 852 p.
- TEMPEST D.W., 1969. The continuous cultivation of micro-organisms. I. Theory of the chemostat. In Methods in Microbiology, Edited by J.R. Norris and D.W. Ribbons, Academic Press, N.Y., 2 (VII) : 259-276.

Reçu le 2 décembre 1994; received December 2, 1994
 Accepté le 24 janvier 1995; accepted January 24, 1995

FRAGMENTATION ET DISSOLUTION DES FRUSTULES DE DIATOMÉES : MÉTHODES DE COMPTAGE POUR APPRÉCIER L'ÉTAT DE CONSERVATION DES ASSEMBLAGES FOSSILES (SYNTHÈSE DE TABLE RONDE)

*Breakage and dissolution of diatom frustules : counting methods
to estimate the conservation state of fossil assemblages
(Workshop)*

F. STRAUB¹ ET C. CORNET²

¹Laboratoire d'algologie, Gymnase cantonal, CH-2300 La Chaux-de-Fonds, Suisse

²Facultés universitaires, Département de géologie, 61 rue de Bruxelles, B-5000 Namur, Belgique

ALGUES
BACILLARIOPHYCEAE
DISSOLUTION
FRAGMENTATION
MÉTHODES
PALÉOÉCOLOGIE
ÉCOLOGIE
HYDROLOGIE
SÉDIMENTATION
TAPHONOMIE

RÉSUMÉ – Au cours d'une table ronde, les méthodes utilisées pour rendre compte de l'état de conservation des assemblages de Diatomées ont été comparées. Certaines de ces méthodes et leurs objectifs sont présentés succinctement. Vu la variété des démarches et des objectifs, mais aussi le manque de résultats comparables, les auteurs renoncent pour l'instant, à proposer une méthode standardisée.

ALGAE
BACILLARIOPHYCEAE
DISSOLUTION
BREAKAGE
METHODS
PALAEOECOLOGY
ECOLOGY
HYDROLOGY
SEDIMENTATION
TAPHONOMY

ABSTRACT – Methods used to measure the conservation state of diatoms assemblages have been compared during a workshop. Some methods and their aims are discussed briefly. A standardized method is not proposed, because the approaches and the aims of the research workers are too different one to another, and because no comparable results are available for instance.

AVANT PROPOS

Les réflexions et les propositions qui composent cet article proviennent d'une table ronde et de discussions diverses, auxquelles ont été invités les participants du 13e colloque de l'ADLaF. Cette table ronde avait été annoncée dans la feuille de contact de notre association (*Diatomania* 4), pour inciter les participants à présenter des matériaux destinés à enrichir la discussion. Avant le colloque, le premier auteur a reçu plusieurs contributions au problème de l'état de conservation des frustules de Diatomées de la part de J.-J. Pichon (Bordeaux), J.-Cl. Druart (Thonon-les-Bains) et de R.J. Flower (Londres). La plupart de ces contributions n'entrent pas directement dans le thème méthodologique re-

tenu pour la table-ronde, mais constituent d'autres approches complémentaires. Ces contributions originales sont présentées dans l'introduction pour clarifier les différents aspects de l'étude de l'état de conservation des Diatomées, pour mettre en évidence les intérêts latents que peuvent en attendre la paléoécologie et la néoécologie et pour mieux dégager les propos développés pendant la table ronde. Les matériaux présentés à cette occasion proviennent surtout des recherches des deux auteurs, qui ont tenté de présenter leur pratique personnelle, de mettre en évidence les procédures comparables et de cerner les approches non conciliables qui tentent d'atteindre des objectifs différents. La table ronde a été suivie par une majorité des participants au colloque. Un petit groupe de discussion composé des deux auteurs, de K. Serieyssol et de J.-Cl. Druart, s'est réuni pour examiner en détail les propositions.

INTRODUCTION

Deux axes méthodologiques principaux peuvent être dégagés de l'intérêt porté par les paléocéologues à la fragmentation et à la dissolution des frustules de Diatomées. Ces deux directions peuvent être caractérisées par deux objectifs complémentaires : (1) tenir compte de l'état partiel de conservation des assemblages pour préciser les estimations quantitatives de populations et par ce biais rendre plus réalistes les reconstitutions paléocéologiques et (2) rendre compte de l'état de conservation pour exploiter cette donnée en terme de reconstitution paléocéologiques, au même titre que les autres qualités des assemblages fossiles. C'est dans cette seconde direction que le thème était défini et que l'essentiel du présent compte-rendu se situe.

Dans la première direction (1) plusieurs démarches complémentaires existent, qui concernent soit la dissolution ou la fragmentation. Parfois les deux processus sont confondus. Rarement ces deux aspects de l'état de conservation des restes de Diatomées, sont relevées séparément. C. Cornet présenta la méthode de Schrader et Gersonde 1978 (Fig. 1) qui consiste à tenir compte des fragments de Diatomées dans les dénombrements. Certains fragments sont retenus pendant le comptage et d'autres sont ignorés, pour tenter de ne pas sous-estimer les taxons fragiles (si les fragments ne sont pas dénombrés avec les valves entières) ou les sur-estimer (éviter de compter plusieurs fois le même frustule à travers ses différents fragments). Quelques auteurs indiquent dans leurs méthodes qu'ils tiennent compte, d'une manière ou d'une autre, des fragments dans leurs dénombrements (p.ex. Battarbee 1978, 1986, Cornet 1986, Schuette et Schrader 1979, Straub 1990, 1993). Par contre dans la plupart des cas, rien n'est dit à propos des fragments. Rien ne permet de savoir si les auteurs intègrent certains fragments à leurs comptages ou les laissent de côté, délibérément ou pour une raison particulière.

Dans les contributions de Pichon *et al.* 1992a et b, Barker *et al.* 1994), comme pour Shemesh *et al.* 1989 ou Barker 1992, le problème consiste à estimer quantitativement la part perdue des populations, dissoute en cours de sédimentation. Cela revient à quantifier le défaut de représentativité (Mikkelsen 1979) entre la population originelle et l'assemblage fossile (processus taphonomiques). Cette estimation se base sur des expériences de dissolution (Mikkelsen 1980) à l'aide d'échantillons fossiles ou d'échantillons actuels qui visent à assigner aux taxons des indices de potentiel de conservation (Denys 1991). Ces indices sont utilisés pour pondérer les fréquences relatives de taxons trouvés dans les assemblages fossiles et permettent ainsi de développer des reconstitutions

paléocéologiques plus réalistes (en particulier lorsque des fonctions de transfert sont utilisées pour reconstituer des paramètres écologiques particuliers, comme la température, le pH ou le taux de phosphore total).

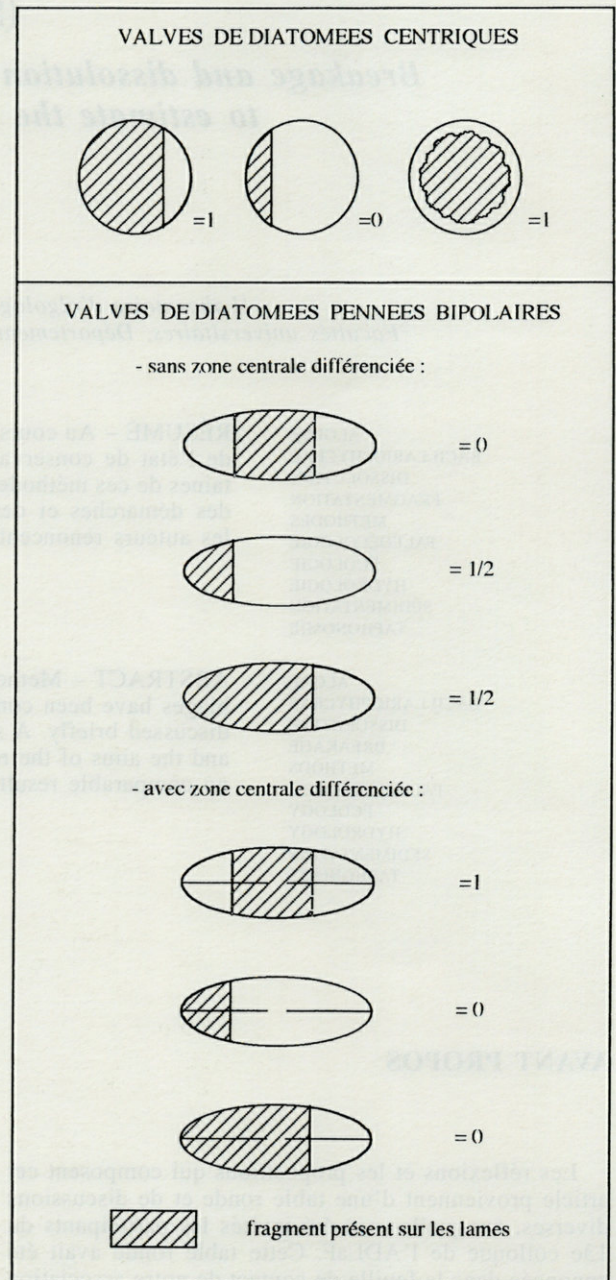


Fig. 1. - Unités de comptage de Cornet 1986 d'après Schrader & Gersonde 1978 utilisées pour tenir compte des fragments de Diatomées, sans surestimer ou sous-estimer certains taxons.

Countage units of Cornet 1986 after Schrader & Gersonde 1978 used to take the fragments of diatoms into account, without over- or under-estimating some taxa.

Dans la seconde direction (2), l'objectif initial de la table ronde, était de mettre en commun les expériences des participants, afin de dégager une méthode standardisée de quantification des différents états de préservation. Cet objectif, qui en vaut la peine selon les propres mots de R. Flower (com. pers.) et qui forme le sujet de thèse de D. Ryves (Londres) est probablement précoce, en tous cas au niveau de notre association, car la motivation des participants est variable pour plusieurs raisons :

– il n'est pas encore démontré que l'investissement supplémentaire en temps débouche sur des résultats suffisamment intéressants ;

– certaines approches sont décevantes et n'ont pas livré les résultats escomptés ;

– il y a encore trop peu de résultats dans la littérature pour comparer ses propres résultats.

Face à cette situation, il a été décidé d'abandonner le projet de standardisation (face au manque d'expérience) et de se contenter d'une approche plus modeste, c'est-à-dire présenter les méthodes connues ou pratiquées actuellement par les deux auteurs. Les méthodes sont présentées avec leur champ respectif d'application, sans déboucher sur une analyse comparative critique, qui est également précoce. Puisse cet article certainement lacunaire, susciter l'intérêt des chercheurs, pour tester les méthodes décrites ou pour en imaginer d'autres. Dans tous les cas l'avis de chacun est attendu, pour nourrir une prochaine table ronde sur le sujet.

Dépassant le contexte méthodique, la contribution de Flower 1993 est le corollaire indispensable à l'estimation de l'état de conservation, puisqu'il s'agit à la fois d'une revue et d'observations originales sur les causes de fragmentation et de dissolution. Cette publication est une aide utile à l'interprétation de figures de dissolution et de fragmentation dans les assemblages fossiles et récents de diatomées.

MÉTHODES D'ESTIMATIONS DE L'ÉTAT DE DISSOLUTION

Certains auteurs abordent l'état de conservation sous l'angle de la quantification plus ou moins sophistiquée des traces de dissolution.

Dans un travail sur la dissolution et la conservation des valves de Diatomées en cours de sédimentation dans la mer Baltique, Schrader 1972 propose une méthode pour quantifier les traces de dissolution observées sur les valves de *Thalassiosira baltica* (Grun.) Oestefeld à différentes profondeurs de la colonne d'eau. La méthode consiste

à mesurer sur photographies en microscopie à balayage pour 30 individus par échantillon :

– la densité de pores (nombres de pores par unité de surface) = n et le diamètre de ceux-ci ;

– le nombre moyen de pointes sur le pourtour des pores et la longueur moyenne de celles-ci. Ces deux grandeurs sont susceptibles de varier avec le degré de dissolution et permettent à l'auteur de définir deux indices :

$$\text{densité de pores} = \frac{1/4\pi (\text{diamètre moyen des pores})}{\text{unité de surface}}$$

$$\text{indice de pointes} = \frac{\text{nombre de pointes}}{\text{nombre de pores}} \text{ long. moy. des dents}$$

Les deux indices sont comparés et utilisés pour montrer chez l'espèce étudiée, que les processus de dissolution ne sont pas constants en cours de sédimentation. Le même auteur (Schrader 1973) propose également une méthode plus simple, où le facteur de dissolution est le rapport entre le nombre de frustules bien préservés et le nombre de frustules qui portent des traces de dissolution.

Dans une étude sur la dissolution des Diatomées en cours de sédimentation dans le lac Baïkal, Flower et Likhoshway 1993, proposent un indice simple qui rend compte de l'état de dissolution des échantillons (DDI = diatom dissolution index). Dans chaque échantillon, plusieurs états de conservation pour les trois taxons communs *Aulacoseira baicalensis*, *Cyclotella minuta* et *Cyclotella ornata* sont relevés en microscopie optique au grossissement $\times 1000$. Par exemple 6 états de conservation sont reconnus (Flower 1993) chez *Cyclotella minuta* (Skvo.) Antipova : 1 = l'état primitif sans trace de dissolution, 2 à 6 = des états progressifs de dissolution. En cours de comptage, les valves dénombrées de chaque taxon commun sont attribuées à ces états de conservation. Cela permet de suivre en détail la progression de la dissolution en cours de sédimentation et de calculer l'indice DDI selon l'équation suivante :

$$\text{DDI} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{1i}}{\sum_{i=1}^n x_{1i} + \sum_{i=1}^n x_{2i}}$$

où x_{1i} = le nombre de valves de l'espèce i dans l'état de conservation 1 (état primitif).

x_{2i} = le nombre de valves de l'espèce i dans les états de moindre conservation (2 ou plus).

Si toutes les valves portent des traces de dissolution l'indice = 0, si toutes les valves sont en bon état (état primitif), l'indice = 1. Les auteurs n'indiquent pas si les stades de dissolution sont standardisés pour les 3 taxons communs (ou au moins pour les taxons du même genre), ou s'il

faut dresser au préalable un catalogue des états de dissolution pour chaque taxon.

Cet indice permet aux auteurs de comparer des échantillons provenant de trappes à sédimentation et des échantillons provenant de la surface des sédiments. En outre cet indice a été utilisé pour mettre en évidence les effets des nettoyages des échantillons sur l'état de conservation des valves de Diatomées. Ces résultats débouchent sur des recommandations (Flower 1993, Flower et Likhoshway 1993) destinées à réduire autant que possible les dégâts occasionnés par les méthodes de préparation (préférer les méthodes à froid, avec des acides dilués, sur échantillons humides).

Dans son étude paléocéologique des Diatomées de sédiments des Vosges et de l'Eifel, Cornet 1986 adopte une méthode d'appréciation plus subjective mais rapide, appliquée à l'échantillon dans son ensemble. Après examen au microscope optique, un taux de conservation des frustules est attribué selon l'échelle suivante, en relevant certaines figures de dissolution (Fig. 2) :

- conservation bonne : tous les individus sont intacts ;

- conservation moyenne : certains individus présentent des figures de dissolution ;

- conservation faible : beaucoup d'individus présentent des traces de dissolution mais sont identifiables ;

- conservation mauvaise : la plupart des individus montrent des traces de dissolution. De nombreux fragments de frustules ne sont pas identifiables.

Si cette méthode n'est pas des plus précises, elle a tout de même le mérite d'être rapide, simple et de pouvoir être appliquée à toutes sortes de conditions paléocéologiques et néoécologiques. Elle a permis à son auteur de rendre compte d'états variés de conservation dans le sondage qu'elle a étudié et de mettre en évidence également des figures de dissolution sur des spicules d'Eponges.

De manière également plus subjective, Straub 1990 et 1993, relève l'état de dissolution (Fig. 2) des valves de Diatomées dans des échantillons de sédiments littoraux et profonds du lac de Neuchâtel (Suisse). Au cours du dénombrement, suite à l'observation des restes (valves entières et fragments) de Diatomées en microscopie optique à fort grossissement, un indice exprimant l'état de conservation (IC) de 0, 0.5 ou 1 est attribué à chaque taxon selon l'échelle suivante :

1 : tous les restes du taxon *i* sont en bon état de conservation

0.5 : environ 50% des restes du taxon *i* portent des traces de dissolution

0 : tous les restes du taxon *i* portent des traces de dissolution.

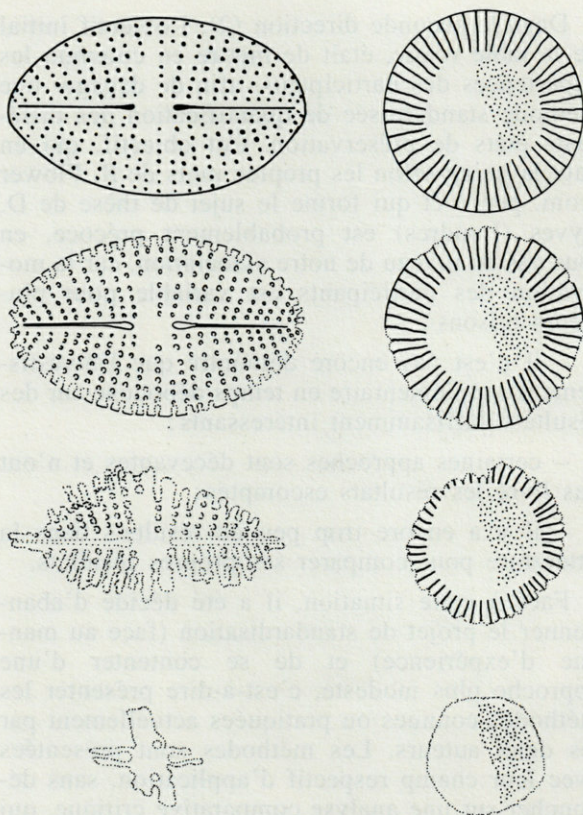


Fig. 2. - Figures courantes de dissolution. Les traces de dissolution les mieux visibles en microscopie optique sont l'élargissement des aréoles et la dissolution des bords des valves.

Current shapes of dissolution. The best visible traces of dissolution under the optical microscope, are the width of corroded areolae and the dissolution of the edges of the valvae.

L'indice ci-dessus est multiplié par l'abondance relative de chaque taxon (Fig. 5), ce qui permet pour chaque unité systématique, d'estimer également l'abondance relative des valves qui ne portent pas (% C) de traces de dissolution. Cette grandeur est utilisée comme telle dans la construction des diagrammes floristiques (Straub 1993, Fig. 4) : l'abondance de chaque taxon est donnée simultanément en noir = fréquence des restes en bon état de conservation et en blanc = fréquence des restes qui portent des traces de dissolution. Cette méthode permet de rendre compte de la vulnérabilité différentielle des taxons face à la dissolution et des variations qualitatives de l'état de dissolution le long d'un sondage. Ces grandeurs permettent de pondérer l'interprétation. Une autre approche consiste à réduire le nombre de variables et d'exprimer (Straub 1990) les abondances des taxons par classe d'adaptation biologique (abondance des aérophiles, des benthiques et des planctoniques). Le relevé proposé des traces de dissolution permet alors dans chaque échantillon,

de calculer un état de dissolution par classe d'adaptation biologique. Cette possibilité est utile en sédimentologie littorale, particulièrement dans des sédiments mélangés, pour différencier la part de Diatomées déposées *in situ* et la part provenant de la dérive ou du ruissellement, cette différence étant nécessaire si l'on veut préciser les reconstitutions paléobathymétriques. Enfin, on peut calculer pour chaque échantillon un taux de dissolution (plus exactement, un taux de valves de Diatomées portant des traces de dissolution) en faisant la somme des fréquences de traces de dissolution relevées pour chaque taxon. Ce taux total de dissolution peut être utilisé pour rendre compte de l'état global de conservation et être utilisé directement pour l'interprétation paléocéologique (hydrodynamique).

Cette méthode est associée à un relevé plus objectif des états de fragmentation (voir ci-dessous) qui ressemble quelque peu à la démarche de Flower et Likhoshway, 1993. Les deux méthodes permettent de comparer les états de dissolution et de fragmentation des restes de Diatomées dans chaque échantillon d'un sondage et de distribuer le rapport de l'un à l'autre (Straub 1993, Fig. 3). Par ce moyen, on peut mettre en évidence la proportionnalité moyenne des deux critères. Cette proportionnalité n'est cependant pas obligatoire. Il existe en effet des échantillons (et ceux-ci sont souvent les plus intéressants en paléocéologie) dans lesquels les taux de dissolution et de fragmentation ne sont pas corrélés. On peut en effet trouver des cas de fragmentation élevée avec peu de traces de dissolution (broutage intense, assèchement) ou l'inverse, c'est-à-dire beaucoup de valves entières portant des traces de dissolution (dissolution secondaire dans le sédiment).

MÉTHODES D'ESTIMATIONS DE L'ÉTAT DE FRAGMENTATION

Un des objectifs de l'étude de Cornet, 1986 était de vérifier pour les fluctuations climatiques du Tardiglaciaire et de l'Holocène, les hypothèses développées par Louis et ses collaborateurs (1981a et b, 1983a, b et c) sur les variations quantitatives des types de fragments de Diatomées comme critère de fluctuations des paléotempératures enregistrées dans les sédiments de la Grande-Pile (Vosges, France). D'après ces auteurs, des fréquences dominantes de fragments terminaux étaient typiques de conditions de réchauffement, tandis qu'au contraire, des fréquences dominantes de fragments centraux étaient caractéristiques de conditions de refroidissement. Pour vérifier ces critères, dans l'étude développée par C. Cornet sur des sédiments des Vosges et de l'Eifel, les types de fragments de Diatomées ont

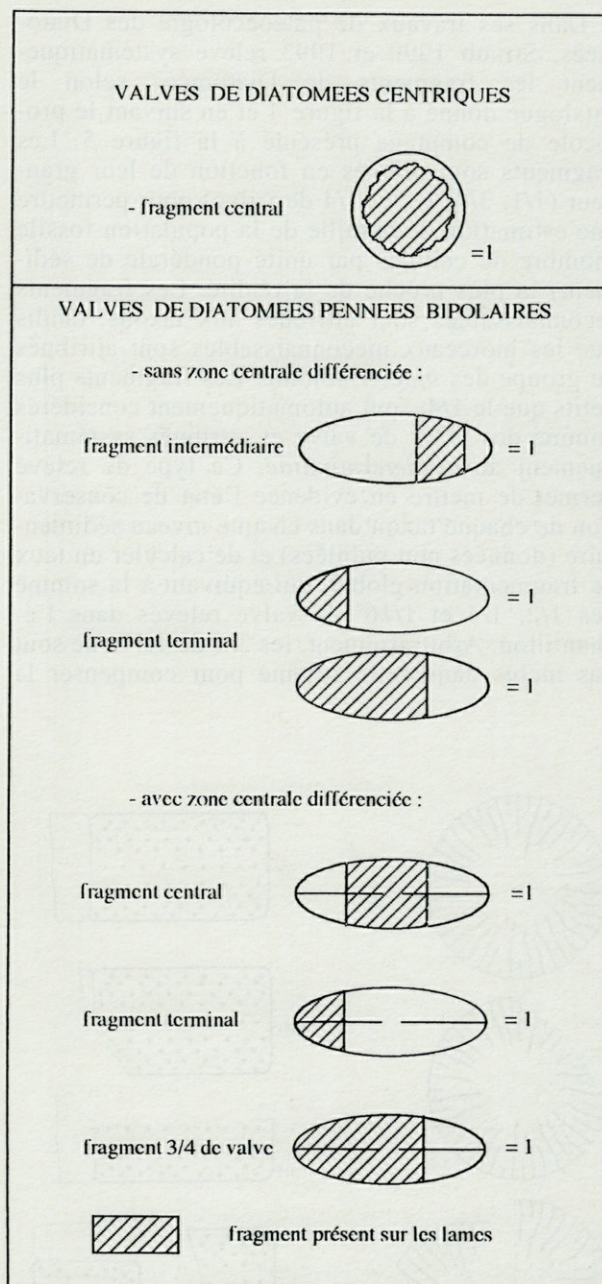


Fig. 3. – Types de fragments relevés par Cornet 1986. Cette analyse débouche sur un compte-rendu de la fréquence relative des différents types de fragments.

Breakage shapes counted by Cornet 1986. This kind of analysis reports the variations of the sorts of fragments.

été relevés selon le catalogue présenté à la figure 3 et les fréquences relatives de ceux-ci distribuées en fonction de la succession des couches sédimentaires. Outre le fait qu'aucune explication expérimentale ne vienne soutenir les hypothèses de A. Louis et de ses collaborateurs sur l'origine de la fragmentation des Diatomées et la préservation des fragments centraux ou terminaux, celles-ci n'ont pas été confirmées par l'étude de C. Cornet.

Dans ses travaux de paléocologie des Diatomées, Straub 1990 et 1993 relève systématiquement les fragments de Diatomées selon le catalogue donné à la figure 4 et en suivant le protocole de comptage présenté à la figure 5. Les fragments sont relevés en fonction de leur grandeur ($1/1$, $3/4$, $1/2$ et $1/4$ de valve) pour permettre une estimation de la taille de la population fossile (nombre de cellules par unité pondérale de sédiment) la plus proche de la réalité. Les fragments reconnaissables sont attribués aux taxons, tandis que les morceaux méconnaissables sont attribués au groupe des *indeterminatae*. Les fragments plus petits que le $1/4$, sont automatiquement considérés comme des $1/16^e$ de valve et attribués systématiquement aux *indeterminatae*. Ce type de relevé permet de mettre en évidence l'état de conservation de chaque taxon dans chaque niveau sédimentaire (données non publiées) et de calculer un taux de fragmentation global, qui équivaut à la somme des $1/2$, $1/4$ et $1/16^e$ de valve relevés dans l'échantillon. Arbitrairement, les $3/4$ de valve ne sont pas inclus dans cette somme pour compenser la

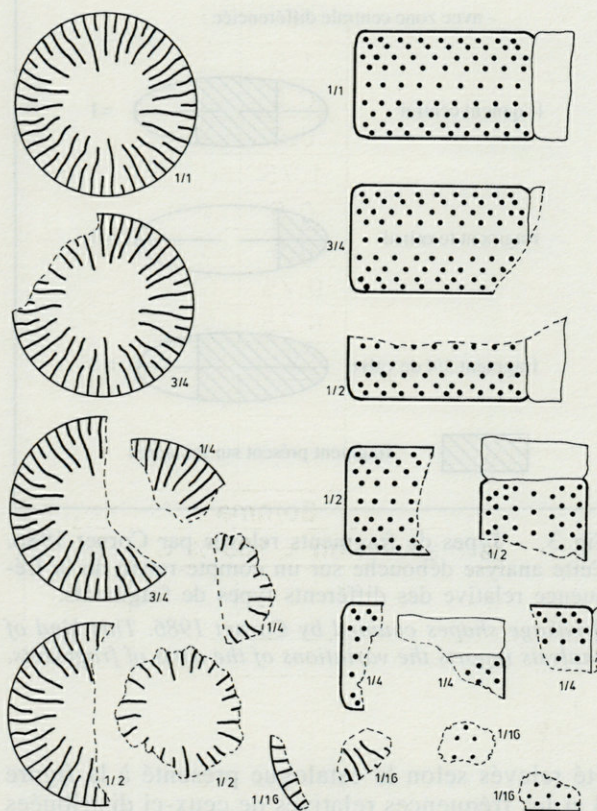


Fig. 4. – Types de fragments relevés par Straub 1990 et 1993. Cette analyse débouche sur un compte-rendu de l'importance quantitative de la fragmentation, par échantillon et par taxon.

Fig. 4. – Breakage shapes counted by Straub 1990 & 1993. This kind of analysis reports the quantitative aspects of breakage, by sample and by taxon.

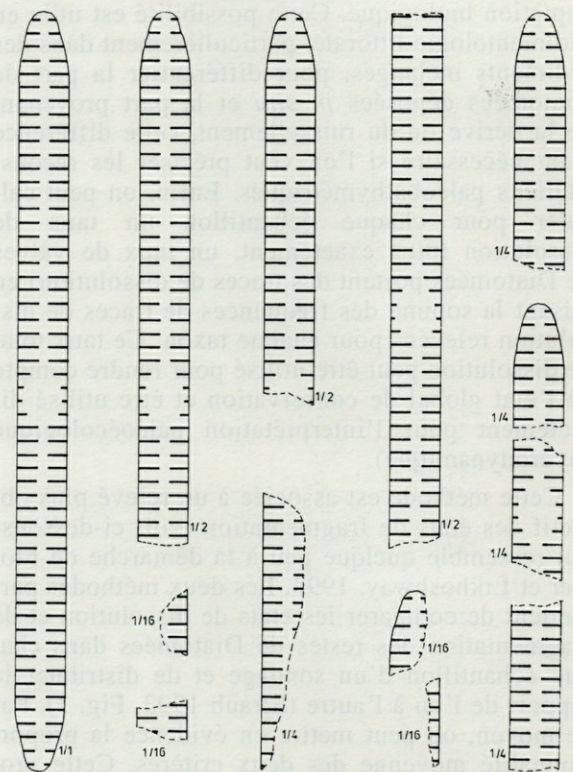


Fig. 4. – Suite, continuation.

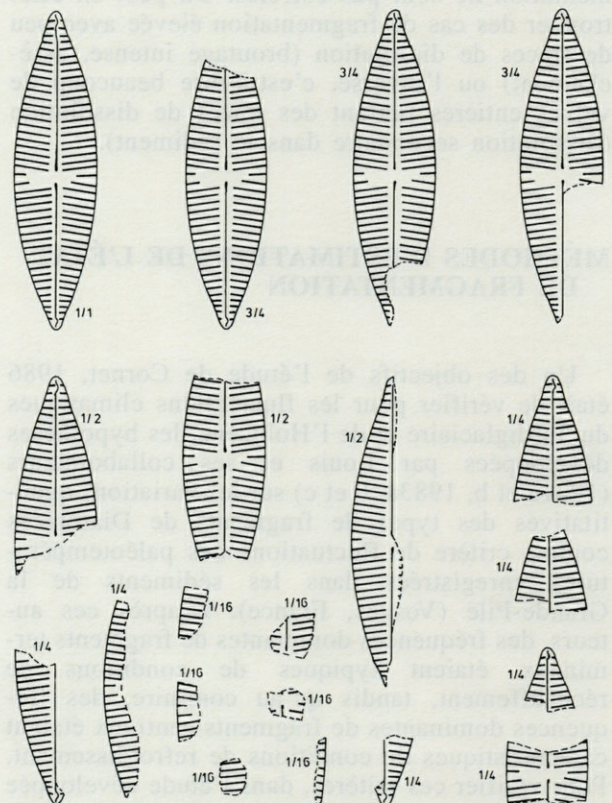


Fig. 4. – Fin, end.

Station	#RCH							
Echantillon	Car. A4 [1953]							
						valves	%	% C
Indeterminata	1 / 1	3 / 4	1 / 2	1 / 4				
0	1 / 16 260			///	40	27.25	5.25	0
I	Taxa	1 / 1	3 / 4	1 / 2	1 / 4			
1	<i>Achnanthes minutissima</i>	///	///			12.25	2.3	2.3
0.5	<i>Amphora pediculus</i>	221	/// /// ///	///	///	249	47.15	23.58
1	<i>Amphora inariensis</i>	141	/// ///	///	/// ///	156.5	29.65	29.65
0.5	<i>Plastogloia smithii</i> v. lac.	///	/	///	66	21.75	4.1	2.05
0.5	<i>Anomoeoneis Zellenis</i>	///		/		3.5	0.65	0.325
1	<i>Navicula</i> sp.	///				5	0.95	0.95
0	<i>Eunotia arcus</i>			/	///	2	0.4	0
1	<i>Fragilaria pinnata</i>				/	0.25	0.05	0.05
0.5	<i>Amphora libyca</i>	///			/	2.25	0.45	0.225
1	<i>Amphora thumensis</i>	/// /// ///	///	///		26.25	5	5
0.5	<i>Achnanthes clevei</i>	///			/	2.25	0.45	0.225
0.5	<i>Achnanthes conspicua</i>	///		/		2.5	0.5	0.25
0	<i>Navicula cryptotenella</i>		///			2.25	0.45	0
0.5	<i>Cocconeis placentalis</i> v. lin	///			/	2.25	0.45	0.225
0	<i>Cocconeis heothumensis</i>	/		/		1.5	0.3	0
0	<i>Gymbella</i> spp.			///	/	1.25	0.25	0
1	<i>Fragilaria pinnata</i> v. lanc.	/				1	0.2	0.2
0	<i>Gomphonema lateripunctatum</i>		/	/	/	1.5	0.3	0
0	<i>Cymatopleura</i> sp				///	0.5	0.1	0
0	<i>Cyclotella</i> spp.				///	0.5	0.1	0
0.5	<i>Navicula tuscula</i>	/	/			1.75	0.35	0.175
0	<i>Achnanthes flexella</i>			/		0.5	0.1	0
0	<i>Caloneis alpestris</i>				///	0.5	0.1	0
0	<i>Cyclotella distinguenda</i>		/			0.75	0.15	0
0	<i>Gymbella delicatula</i>		/			0.75	0.15	0
1	<i>Achnanthes rosenstockii</i>	///				2	0.4	0.4
						Somme % C : 65.61		
						% dissolution = 100-% C : 34.4		
	1 / 16	1 / 1	3 / 4	1 / 2	1 / 4			
Σ	260	413	62	32	146			
valves							%	
% entières		413	46.5			459.5	89.6	
% fragmentées		16.5		16	36.5	69	13.1	

Fig. 5. – Exemple de protocole de dénombrement développé par Straub 1990 et 1993, pour rendre compte des états de dissolution et de fragmentation des Diatomées dans les sédiments du lac de Neuchâtel (Suisse).

Example of counting chart used by Straub 1990 & 1993, to report the dissolution and breakage states of diatoms in the sediments of lake Neuchâtel (Switzerland).

fragmentation liée à la méthode de préparation des Diatomées. Cet aspect variable de l'état des assemblages fossiles est utilisé comme tel, soit pour pondérer et relativiser l'interprétation (lorsque la fréquence de *indeterminatae* est élevée) ou pour développer celle-ci dans ses tentatives de reconstituer l'hydrodynamisme dans les paléoenvironnements étudiés.

CONCLUSION

La mise en commun de nos pratiques et de nos questions en matière d'état de conservation des assemblages de Diatomées débouche sur des avis contrastés. Cet aspect de l'étude des Diatomées intéresse les chercheurs, mais l'investissement en temps nécessaire pour rendre compte de l'état de dissolution ou de fragmentation, retient encore la plupart, d'autant plus que les données publiées sont rares et contradictoires. En comparant, les différentes approches résumées ci-dessus, on remarque que les démarches sont multiples, qu'elles ne répondent pas toujours aux mêmes objectifs et que dans cette mesure, la volonté de standardisation est déplacée. Adopter une méthode commune dans ce domaine est encore précoce, nécessite aussi d'autres propositions et surtout requiert une plus grande documentation permettant de prouver le bien-fondé de cette démarche.

BIBLIOGRAPHIE

- BARKER P., 1992. Differential diatom dissolution in late quaternary sediments from Manyara, Tanzania : an experimental approach. *J. Paleolimnol.* **7** (3) : 235 - 251.
- BARKER P., J.C. FONTES, F. GASSE & J.C.L. DRUART, 1994. Experimental dissolution of diatom silica in concentrated salt solutions and implications for paleoenvironmental reconstruction. *Limnol. Oceanogr.* **39** (1) : 99-110.
- BATTARBEE R.W., 1978. Observations on the recent history of Lough Neagh and its drainage basin. *Phil. Trans. R. Soc. London B* **281** : 303-345
- BATTARBEE R.W., 1986. Diatom analysis. In Berglund, B.E. (ed.), Handbook of holocene palaeoecology and palaeohydrology. John Wiley & Sons Ltd., 527-570.
- CORNET C., 1986. Contribution à l'étude de l'évolution paléocéologique de la fin du Quaternaire dans les Vosges et l'Eifel, d'après les Diatomées d'eau douce. Thèse, Univ. Catholique Louvain : 1-176.
- DENYS L., 1991. A check-list of the diatoms in the holocene deposits of the western belgian coastal plain with a survey of their apparent ecological requirements. I. Introduction, ecological code and complete list. Serv. géolog. Belgique, Profes. paper **246** : 1-41.
- FLOWER R.J., 1993. Diatom Preservation - Experiments and Observations on Dissolution and Breakage in Modern and Fossil Material. *Hydrobiologia* **269/270** : 473-484.
- FLOWER R. & Y. LIKHOSHWAY, 1993. Diatom preservation in lake Baikal. In : Diatom algae as indicators of the changes of climate and environment, Limnological Institut, Abstracts of the 5th workshop on Diatom Algae, March 16-20, 1993, Irkutsk, Russia : 77-78
- LOUIS A. & J. SMEETS, 1981a. Etude détaillée des fluctuations algales comme paramètres des fluctuations thermales dans un refroidissement (Melisey II) de l'Interglaciaire Riss-Würm. *Stud. Algol. Lovan.* **10** : 1-241.
- LOUIS A. & D. DE CREMER, 1981b. Les fluctuations algales paramètres des fluctuations thermales au St. Germain II et à l'Eowürm. *Stud. Algol. Lovan.* **11** : 1-370.
- LOUIS A. & L. ERMIN, 1983a. Les fluctuations climatiques au Pré-Eémien et au début de l'Eémien déduites des fluctuations algales. *Stud. Algol. Lovan.* **12** : 1-126.
- LOUIS A. & PETERS J., 1983B. Les fluctuations climatiques de l'Eémien, du Melisey I et du St. Germain I déduites des fluctuations algales fossiles. *Stud. Algol. Lovan.* **13** : 1-270.
- LOUIS A. & coll., 1983c. Fluctuations climatiques au Néowurm et au Préboréal déduites des fluctuations algales. *Stud. Algol. Lovan.* **15** : 1-190.
- MIKKELSEN N., 1979. Diatoms in equatorial deep-sea sediments : sedimentation and dissolution over the last 20000 years. In : Simonsen, R. (ed.), Proc. 5th. Symp. on Recent and Fossil Diatoms, Antwerp 1978 (Nova Hedwigia Beiheft 64) : 489-502.
- MIKKELSEN N., 1980. Experimental dissolution of Pliocene diatoms. *Nova Hedwigia* **33** : 893-907.
- PICHON J.J., G. BAREILLE, M. LABRACHERIE, L.D. LABEYRIE, A. BAUDRIMONT & J.L. TURON, 1992. Quantification of the biogenic silica dissolution in Southern Ocean sediments. *Quaternary Research* **37** : 361-378.
- PICHON J.-J., L.D. LABEYRIE, G. BAREILLE, M. LABRACHERIE, J. DUPRAT & J. JOUZEL, 1992. Surface water temperature changes in the high latitudes of the southern hemisphere over the last glacial interglacial cycle. *Paleoceanography* **7** (3) : 289 - 318.
- SCHRADER H.J., 1972. Auflösung und Konservation von Diatomeenschalen beim Absinken am Beispiel des Landsort-Tiefs in der Ostsee. In : Simonsen, R. (ed.), Proc. 1st. Symp. on Recent and Fossil Marine Diatoms, Bremerhaven 1970 (Nov. Hedw. Beiheft 39) : 191-216.
- SCHRADER H.J., 1973. Proposal for a standardized method of cleaning diatom-bearing deep-sea and land-exposed marine sediment. In : Simonsen, R. (ed.) : Proc. 2nd. Symp. on Recent and Fossil Marine Diatoms, London 1972 (Nov. Hedw. Beiheft 45) : 403-409.

- SCHRADER H.-J. & R. GERSONDE, 1978. Diatoms and silicoflagelates. *Utrecht Micropaleo. Bull.* **17** : 129-176.
- SCHUETTE G. ET H.-J. SCHRADER, 1979. Diatom taphocoenoses in the coastal upwelling area off western South America. *In* : Simonsen, R. (ed.) : Proc. 5th. Symp. on Recent and Fossil Diatoms, Antwerp, 1978 (Nov. Hedw. Beiheft 64) : 359-378.
- SHEMESH A., H.L. BURCKLE & P.N. FROELICH, 1989. Dissolution and preservation of Antarctic diatoms and the effect on the sediment thanatocoenoses. *Quaternary Research* **31** : 288 - 308.
- STRAUB F., 1990. Hauterive-Champréveyres, 4. Diatomées et reconstitution des environnements préhistoriques. Saint-Blaise, Ed. du Rueau. *Archéologie neuchâteloise* **10** : 1-120.
- STRAUB F., 1993. Diatoms and their preservation in the sediments of Lake Neuchâtel (Switzerland) as evidence of past hydrological changes. *Hydrobiologia* **269/270** : 167-178.

Reçu le 19 décembre 1994 ; received December 19, 1994
Accepté le 26 janvier 1995 ; accepted January 26, 1995

**CYMBELLA TRIANGULUM (EHRENBERG) EHR. (BACILLARIOPHYCEAE),
UN TAXON NOUVEAU POUR LA FLORE EUROPÉENNE
CARACTÉRISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES**
*Cymbella triangulum (Ehrenberg) Ehr. (Bacillariophyceae), a new taxon for the European flora
Morphological and ecological characteristics*

J. BERTRAND*, M. COSTE**

*42, rue Malvoisine, 45800 Saint Jean de Braye, France

**CEMAGREF, Qualité des Eaux, 50 av. de Verdun, BP3, 33611 Gazinet Cedex, France

Cymbella triangulum (Ehr.) Cl. a été récolté dans le canal latéral à la Loire près d'Orléans. Cette espèce d'origine américaine, décrite par Ehrenberg au siècle dernier, n'a pas été recensée à ce jour en Europe. Le polymorphisme valvaire est examiné en microscopie photonique et électronique à balayage. L'absence de données autécologiques détaillées conduit à aborder l'examen des exigences de l'espèce à l'aide des formes dominantes associées. Les causes de sa dissémination pourraient être attribuées à l'introduction récente de la Tortue de Floride.

Cymbella triangulum was collected for the first time in a canal running along the river Loire near by Orleans in the centre of France. This species, described by Ehrenberg in 1845, is known, up to now, only from North American countries. The most recent examination of its distribution is due to Patrick & Reimer, 1975. Morphological aspects and polymorphism are briefly examined under light and scanning microscopes. Few ecological data are available about this species and its main requirements are observed through associated taxa. Distribution could be assigned to the recent invasion of French running waters by the Floridean turtle.

**MOUVEMENT DES DIATOMÉES. IV. LE MOUVEMENT TRANSAPICAL
DE COCCONEIS PEDICULUS (EHRENBERG)**

Diatom movements. IV. Transapical movement of Cocconeis pediculus

J. BERTRAND

42 rue de Malvoisine, 45800 Saint Jean de Braye, France

Bien que vivant en épiphyte, *Cocconeis pediculus* se déplace fréquemment et pour cela réalise des mouvements identiques aux autres Diatomées raphidées. Cette espèce monoraphidée a une face valvaire concave transapicalement qui contient le raphé. Elle exécute de surprenants mouvements transapicaux de 180° qui sont observés, décrits et analysés dans ce travail : ils posent un difficile problème de biomécanique. Cette étude sert également de test de vérification de trois hypothèses concernant la compréhension des mouvements des Diatomées : Harper (1967), Hopkins & Drum (1966), Edgar & Pickett-Heaps (1983), sans parvenir à faire un choix définitif. Des moyens tels que la géométrie descriptive, l'analyse cinématique graphique, la statique graphique sont utilisés et, grâce à la connaissance de la densité, ils permettent une estimation des efforts nécessaires à la Diatomée pour exécuter ses mouvements transapicaux.

Although living as epiphyte, *Cocconeis pediculus* moves frequently and in order to do so, it moves in the same way as the other raphide diatoms. This monoraphide species has a concave valvar and transapical side which contains the raphe. It evolves through surprising 180° transapical movements which are observed, described and analysed in the following study; and they arise a difficult problem of bio-mechanics. This study also serves as a test for three assumptions concerning the understanding of diatoms movements : Harper (1967), Hopkins (1966), Edgar & Pickett-Heaps (1983) without succeeding in taking a final choice. Tools as descriptive geometry, graphical cinemathical analysis and graphical statics are being used and thanks to the knowledge of density they enable to estimate the efforts a diatom needs in order to do those transapical movements.

**RÔLE DES DIATOMÉES DANS LA NUTRITION DES TILAPIAS DE DEUX LACS DU MALAWI
(CENTRE AFRIQUE)**

Diatoms in food-resources of Tilapias in two lakes of Central Africa (Malawi)

A. CAZAUBON*, N. MAWANYAMA & A. CHAMPEAU****

*Laboratoire d'Ecologie des Eaux continentales méditerranéennes, Université Aix-Marseille 3, 13320 Marseille Cedex 20, France
**Laboratoire d'Hydrobiologie, Université Aix-Marseille 1, 13320 Marseille Cedex 3, France

L'étude de la transparence de l'eau, de la chlorophylle *a* et du peuplement algal périphytique et phytoplanctonique de 2 lacs du Malawi permet de mettre en évidence l'existence d'un gradient Nord-Sud d'eutrophisation depuis la zone profonde oligomictique du lac Malawi jusqu'à la partie littorale du bras sud-est de ce lac et au lac de Malombé, lac polymictique peu profond. Ces algues constituent la ressource trophique de *Chambos Oreochromis lidole*, *O. squamipinnis* et *O. karongae*. L'étude des contenus stomacaux de ces Tilapias montre que le régime alimentaire est dominé par un peuplement de Diatomées phytoplanctoniques (*Aulacoseira nyassensis*, *Surirella*, *Stephanodiscus*, *Cymatopleura*, *Rhopalodia*) dont les variations spatio-temporelles sont analysées au cours du cycle hydrologique du lac.

Two lakes of central Africa (Rift valley), present two very different levels of catch, very important in the small Malombe Lake while strongly lower in the Malawi Lake. The study of chlorophyll *a*, transparency, particulate nutrient and composition of algal communities shows an increasing eutrophic gradient in available food-resources, from north, deep oligomictic zone of the lake Malawi, to south, shallow and polymictic Lake Malombe. The plankton is partly utilised by chambos (*Oreochromis lidole*, *O. squammipinnis* and *O. Karongae*), fish greatly appreciated by Malawians. The study of stomach contents of these tilapia reveals a microphage diet dominated by phytoplankton (*Aulacoseira nyassensis*, *Surirella bifrons*, *S. biseriata*, *Stephanodiscus*, *Cymatopleura*, *Rhopalodia*). The spatiotemporal variations of these algae in the lakes and in the stomach contents are both analysed.

**REMARQUES SUR LA DISTINCTION ENTRE LES GENRES *GOMPHONEIS* ET *GOMPHONEMA*
À L'OCCASION DE LA DÉCOUVERTE D'UNE NOUVELLE ESPÈCE DE *GOMPHONEMA*
À STRIES DOUBLEMENT PONCTUÉES**

Observations on the distinction between the genera Gomphoneis and Gomphonema with regard to the description of a new species of Gomphonema with double punctate striae

P. COMPÈRE

Jardin botanique national, Domaine de Bouchout, B-1860 Meise, Belgique

Une nouvelle espèce appartenant au complexe *Gomphonema-Gomphoneis* a été découverte dans un échantillon prélevé sous des rochers arrosés par les embruns des chutes de la Tshopo à Kisangani (Zaïre). Dans un premier temps, la présence de stries formées de deux rangées d'aréoles semblait indiquer l'appartenance de cette nouvelle espèce à *Gomphoneis*. Cependant, en lui appliquant l'analyse cladistique préliminaire proposée pour ce groupe par Kociolek & Stoermer (1993), il devint vite évident qu'elle ne pouvait appartenir à aucun des deux groupes reconnus par ces auteurs au sein de *Gomphoneis* : les groupes *elegans* et *herculeana*. Des deux groupes, elle diffère en effet par l'absence de lame marginale interne couvrant partiellement les alvéoles ; du groupe *herculeana*, elle diffère en outre par l'absence de plaque axiale interne ; du groupe *elegans* elle diffère encore par la présence d'un stigma dans le nodule central et l'absence de stigmoïdes. Elle ne partage l'ensemble des 13 caractères utilisés par Kociolek & Stoermer dans leur analyse cladistique avec aucune des espèces classées dans *Gomphoneis*. Par contre, elle partage tous ces caractères avec *Gomphonema blandiculum* Koc. & Stoerm., le seul *Gomphonema* traité dans cette étude présentant des stries formées de deux rangées de points. Cette espèce et le matériel zaïrois diffèrent en outre de *Gomphonema* sensu stricto par l'absence d'occlusions externes des aréoles et se rapprochent ainsi d'un groupe de *Gomphonema* est-africains. Ceux-ci ne différeraient du nôtre que par les stries formées d'une seule rangée de points, mais chez une de ces espèces, *G. aequatoriale*, ce caractère paraît assez variable, comme en témoignent des photos publiées par Kociolek & Stoermer. L'observation, par plusieurs auteurs, de stries unisériées devenant partiellement bisériées chez diverses espèces de *Gomphonema* semble bien indiquer qu'il ne faut pas accorder trop d'importance à ce caractère. L'analyse cladistique de Kociolek & Stoermer montre que ni *Gomphoneis* ni *Gomphonema* ne sont des groupes monophylétiques et qu'il faut donc s'attendre à de nouvelles coupures (ou à des regroupements?). Actuellement il paraît sage de décrire la nouvelle espèce dans le genre *Gomphonema* où elle forme un groupe très homogène avec *G. blandiculum*, *G. intermedium*, *G. irroratum*, *G. alineae* et quelques autres, voisin du groupe de *G. aequatoriale* Hust. et des autres *Gomphonema* et *Gomphocymbella* est africains, mais assez différent des *Gomphonema* sensu stricto.

A new species belonging to the *Gomphonema-Gomphoneis* complex has been found in samples from wet rocks, sprayed by water, under the waterfalls of the Tshopo river, near Kisangani (Zaire). At first examination, the observation of striae made of two rows of areolae seemed to indicate that this new species could belong to *Gomphoneis*. However, an attempt to apply to this material the preliminary cladistic analysis of the gomphonemoid diatoms by Kociolek & Stoermer (1993) shows that it cannot belong to any of both groups recognized in *Gomphoneis* by these authors : the *elegans*- and *herculeana*-groups. From both groups the Zairan material differs by the lack of internal marginal plate on the alveolae ; from *herculeana*-group, it also differs by the lack of an internal axial plate partially closing the alveolae ; from *elegans*-group, it still differs by the lack of stigmoïdes and the presence of a true stigma in the central nodule. It does not share the whole set of character states used by Kociolek & Stoermer in their cladistic analysis with any of the species classified in *Gomphoneis* by these authors. On the other hand, it shares all the thirteen character states with one of the species treated as *Gomphonema*, *G. blandiculum* Koc. & Stoerm., the only *Gomphonema* species treated in this study provided with striae made of two rows of puncta. This species, as well as that from Zaire, also differs from *Gomphonema* sensu stricto by the lack of external occlusions of the areolae ; they share this character with a group of East African species of *Gomphonema* which mainly differs from the Zairan material by the striae made of only one row of puncta. However, this character seems somewhat variable and a tendency towards double punctate striae is displayed for at least one of the species of this group, *G. aequatoriale*, according to micrographs published formerly by Kociolek & Stoermer. Observation in several species of *Gomphonema* of uniseriate striae becoming partially biseriata seems to indicate that too much weight should not be given to this character. The preliminary cladistic analysis of Kociolek & Stoermer shows that neither *Gomphoneis* nor *Gomphonema* are monophyletic groups. New splittings (or lumpings?) could be foreseen in this group. In the present state of things the Zairan material is best allotted to a new species of the genus *Gomphonema* where it belongs, with *G. intermedium*, *G. irroratum*, *G. alineae*, and some other to a rather homogeneous group of species, characterized by doubly punctate striae and stigma opening internally by a slit, not far from *G. aequatoriale* and some other East African species of *Gomphonema* and *Gomphocymbella*, but rather different from *Gomphonema* sensu stricto.

ESSAI D'ESTIMATION DE LA QUALITÉ BIOLOGIQUE DES COURS D'EAU DU BASSIN RHIN-MEUSE À L'AIDE DES COMMUNAUTÉS DE DIATOMÉES ET D'INVERTEBRÉS. ÉVOLUTION COMPARÉE DES INDICES BIOLOGIQUES ET DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU

M. COSTE¹, A. LENOIR¹ & G. DEMORTIER²

¹CEMAGREF, Qualité des Eaux, 50 avenue de Verdun, BP 3, 33611 Gazinet Cedex

²Agence de l'Eau Rhin-Meuse, Division milieu naturel, BP 19 Rozérieulles, 57161 Moulins-Les-Metz

L'étude des communautés de Diatomées benthiques de 109 cours d'eau du Bassin Rhin-Meuse a été réalisée en 1992 sur 220 stations du Réseau National de Bassin (RNB) lors de deux campagnes estivales (juin et septembre). La prospection mensuelle de 10 stations complémentaires menée conjointement, a permis d'évaluer l'impact des fluctuations saisonnières sur les estimations biologiques de la qualité des eaux obtenues à l'aide des Invertébrés et des Diatomées. L'examen de 975 relevés phycologiques a conduit à recenser plus de 600 taxons. Chaque inventaire a donné lieu au calcul de 8 indices diatomiques et deux indices de diversité. Des confrontations entre estimations indicielles, nature des substrats et faciès, et les résultats de plus de 2400 analyses physico-chimiques fournis par l'Agence, ont été réalisées à l'aide de logiciels d'analyse de données (ADDAD, ADE). Les principaux résultats confirment l'intérêt de l'approche diatomées et ses limites. La capacité d'intégration de ces algues est testée à partir des caractéristiques physico-chimiques de l'eau durant les mois précédant le prélèvement. Les causes de fluctuations des résultats liées à la nature de l'échantillonnage et à la période de prospection sont examinées et discutées. Le caractère global des estimations indicielles ne permet pas de distinguer l'aspect organique ou salin des pollutions. La mise au point d'indices plus spécialisés, préalablement testés sur des jeux de données volumineux et/ou obtenus à partir de compilations bibliographiques automatisées est proposée et illustrée à l'aide d'exemples extraits de l'étude.

TAXONOMIE ET ULTRASTRUCTURE DE *GOMPHONEMA RHOMBICUM* FRICKE, 1904. COMPARAISON AVEC *GOMPHONEMA CLEVEI* FRICKE, 1902 ET *GOMPHONEMA BREVIstriATA* HERIBAUD, 1903

Taxonomy and ultrastructure of Gomphonema rhombicum Fricke, 1904. Comparison with Gomphonema clevei Fricke, 1902 and Gomphonema brevistriata Héribaud, 1903

L. ECTOR^{*}, M. COSTE^{} & R. ISERENTANT^{***}**

^{*}Centre de Recherche Public, Centre Universitaire, Cellule d'Hydrobiologie, 126 A, avenue de la Faïencerie, L-1511 Luxembourg, Grand-Duché de Luxembourg

^{**}CEMAGREF, Qualité des eaux, 50 avenue de Verdun, Gazinet, BP 3, 33611 Gazinet Cedex, France

^{***}Université Catholique de Louvain, Unité d'Ecologie et de Biogéographie, 5 place Croix du Sud, B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

Gomphonema rhombicum Fricke, 1904 est abondant dans l'épilithon des rivières de Galice (Nord-ouest de l'Espagne); il est aussi présent dans certains petits cours d'eau de Corse et de l'Ardèche (Sud-Est de la France). Les populations d'Espagne et de France ont été observées en microscopie optique et électronique. Les individus d'Espagne ont jusqu'à quatre stigmas alors que ceux de France en possèdent un ou deux. Les stries sont toujours composées d'une double série de points disposés en quinconce; cette structure particulière des stries, difficile à reconnaître au microscope optique, ne nous semble pas un caractère suffisant pour rattacher ce taxon au genre *Gomphoneis*. *Gomphoneis rhombicum*, découvert par Fricke en Angleterre, est souvent confondu avec *Gomphonema clevei*. Nous avons pu retrouver et photographier les individus types de *Gomphonema clevei* Fricke, 1902, originaire d'Afrique Orientale (Deutsch-Ostafrika), ainsi que de *Gomphonema brevistriata* Héribaud, 1903, découvert dans un échantillon fossile du Cantal (Auvergne, France).

Gomphonema rhombicum Fricke, 1904 is an abundant diatom in stream epilithon of Galicia (NW Spain). It is also found in some streams of Corsica and Ardèche (SE France). Specimens from French and Spanish populations were observed with electron and light microscopy. Spanish specimens have up to four stigmata, whereas French ones have only one or two. The striae are biseriate with pores in staggered rows. This structure is difficult to identify under light microscope and does not seem to be sufficient to assign this taxon to the *Gomphoneis* genus. *Gomphonema rhombicum*, discovered in England by Fricke, is often confused with *Gomphonema clevei*. We managed to find and photograph the type specimens of *Gomphonema clevei* Fricke, 1902, which originates from East Africa (Deutsch-Ostafrika), as well as the types of *Gomphonema brevistriata* Héribaud, 1903, which was discovered in a fossil sample from Cantal (Auvergne, France).

LE PÉRIPHYTON EN TANT QUE TÉMOIN ET ACTEUR DU FONCTIONNEMENT DES COURS D'EAU

Periphyton as witness and actor in river functioning

A. EULIN*

*Laboratoire d'Hydrobiologie, Université Paul Sabatier, route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex, France

Ce travail a eu pour but de déterminer si ou non, l'épilithon est une communauté apte à caractériser la qualité de l'eau. Deux expériences sur substrats artificiels, l'une en étiage d'hiver et l'autre en étiage d'été, nous ont permis d'étudier les impacts potentiels de différentes perturbations ponctuelles sur la Garonne (papeterie, retenues artificielles, station d'épuration d'un grand centre urbain et centrale nucléaire). Pendant toute la durée des expériences (quatre semaines), les substrats artificiels ont été collectés toutes les semaines. La cinétique de croissance de l'épilithon a été estimée en tant que poids de matière sèche, poids de matière organique et chlorophylle *a*. Avec les mêmes échantillons, le carbone, l'azote et le phosphore épilithique ont été quantifiés. Les densités cellulaires et les abondances relatives de chaque espèce ont aussi été estimées afin d'étudier la structure des communautés. Les valeurs de l'alcalinité, du pH et de la dureté sont typiques d'un cours d'eau de région calcaire. L'évolution amont-aval de la conductivité et des composés de l'azote et du phosphore montre la transition d'un cours d'eau de basse montagne vers un fleuve de plaine. L'élévation progressive du degré trophique et de la minéralisation est masquée par les impacts des pollutions. La biomasse épilithique augmente de la station 1 à la station 8 (de 1.44 à 2.26 mg chl *a*/dm² en hiver et de 0.15 à 1 mg chl *a*/dm² en été). Les biomasses sont plus élevées à l'aval de Toulouse, mettant ainsi en évidence l'enrichissement en nutriments dû à la présence de l'agglomération toulousaine. Les valeurs moyennes sont plus élevées en hiver (167 mg M.O./dm² et 1.56 mg chl *a*/dm²) qu'en été (88 mg M.O./dm² et 0.63 mg chl *a*/dm²). Après l'effluent de la papeterie, on peut observer une élévation de la matière organique et de la chlorophylle *a* en relation avec le développement des Chlorophycées, alors que le nombre de Diatomées diminue. L'enrichissement en nutriment dû à la présence de l'agglomération toulousaine induit un accroissement important de la biomasse épilithique. Le carbone et l'azote épilithique évoluent en fonction de la biomasse. Il n'y a pas d'accumulation significative de l'azote. Le phosphore, par contre, peut représenter de 1.3 à 3.3 % de la matière organique au niveau des stations polluées. Pour les autres stations, les valeurs varient entre 0.8 % et 1 %. En hiver, les communautés épilithiques sont caractérisées par *Achnanthes minutissima* Kütz., *Cymbella minuta* Hilse & Rabenhorst, *Diatoma ehrenbergii* Kütz., *Diatoma vulgare* Bory, *Navicula lanceolata* (Agardh) Ehr., *Nitzschia fonticola* Grunow, et en été par, *Achnanthes minutissima* Kütz., *Cocconeis placentula* Ehr., *Cyclotella stelligera* Cleve & Grunow, *Navicula saprophila* L-B & Bonik, *Nitzschia fonticola* Grunow.

The aim of the work is to determine whether or not the epilithon is a suitable community to characterize the water quality. Two experiments with artificial substrates were carried over a winter and summer low water period, in the Garonne river. The impacts of different potential pollutions (paper mill, waste water treatment plant, nuclear power station) were studied. All along the experiments, which lasted for four weeks, artificial substrates were collected every week. The epilithon growth kinetic was estimated by quantifying the biomass as dry weight, ash-free dry weight and chlorophyll *a*. With the same samples, epilithon carbon, nitrogen and phosphorus content were estimated. Cell densities and relative abundance for each species were also estimated to study the structure of communities. Alkalinity, pH and hardness have typical values for a limestone region stream. Conductivity, nitrogen and phosphorus compounds show the transition between a mountain stream to a plain stream. Trophic degree and mineralization progressive increase is masked by the impacts of pollutions (paper mill, great urban center, artificial reservoirs and nuclear power station). The epilithic biomass increases from station 1 to station 8 (from 1.44 to 2.26 mg chl *a*/dm² in winter and from 0.15 to 1 mg chl *a*/dm² in summer). Biomasses are higher after Toulouse, showing a nutrient enrichment by the waste water treatment plant. Mean values are higher in winter (167 mg M.O./dm² and 1.56 chl *a*/dm² at 21 days) than in summer (88 mg M.O./dm² and 0.63 mg chl *a*/dm² at 21 days). After the paper mill effluent, an increase in the organic matter and chlorophyll *a* can be observed in relation to the development of the Chlorophyceae, whereas the Diatom number is decreasing. The nutrient enrichment after the great urban center, Toulouse, causes an important epilithic biomass increase. Carbon and nitrogen epilithon content follow the biomass accumulation. No significant nitrogen accumulation is observed. Epilithon phosphorus content can represent from 1.3 to 3.3 % of the organic matter at the polluted stations. At the other stations, values vary from 0.8 to 1%. In winter, epilithon communities are characterized by *Achnanthes minutissima* Kütz., *Cymbella minuta* Hilse & Rabenhorst, *Diatoma ehrenbergii* Kütz., *D. vulgare* Bory, *Navicula lanceolata* (Agardh) Ehr., *Nitzschia fonticola* Grunow; and in summer, by *Achnanthes minutissima* Kütz., *Cocconeis placentula* Ehr., *Cyclotella stelligera* Cleve & Grunow, *Navicula saprophila* L-B & Bonik, *Nitzschia fonticola* Grunow.

**SENSIBILITÉ DIFFÉRENTIELLE ET ESSAI DE CLASSEMENT
DE QUELQUES DIATOMÉES D'EAU DOUCE APPARTENANT AU GROUPE
DES ESPÈCES RÉSISTANTES DES EAUX POLYSAPROBES**

Differential sensitivity and tentative classification of some freshwater diatoms among the most resistant taxa in polysaprobic conditions

R. ISERENTANT*

Université Catholique de Louvain, Unité d'Ecologie et de Biogéographie, 5 place Croix du Sud, B-1348 Louvain-La-Neuve, Belgique

Dans les eaux chargées en matières organiques (moyennes de DBO₅ : 69 à 184 mg O₂/l) d'une station d'épuration à macrophytes (Doische, Belgique) se développent des peuplements de Diatomées caractéristiques des eaux polysaprobies. L'observation répétée, – à intervalles de 3 semaines, du 19 mai au 4 octobre 1993 –, de la recolonisation du substrat et de l'ordre d'apparition et de prolifération des taxons le long du gradient décroissant de la DBO₅, de l'amont vers l'aval des 5 bassins plantés de la station, montre toutefois une gradation dans la résistance des 10 taxons les plus fréquents. *Nitzschia capitellata* Hust. domine nettement et de façon régulière en amont et apparaît ici comme l'espèce la plus résistante; à partir du second bassin se développent *Nitzschia palea* (Kütz.) W. Sm., *Navicula saprophila* L.-B., *Gomphonema parvulum* f. *saprophilum* L.-B. & Reichardt, *Navicula atomus* v. *permitis* (Hust.) L.-B. ainsi que, moins abondant, *N. molestiformis* Hust. et à partir du 3e bassin *Navicula accomoda* Hust., *N. subminuscula* Manguin et *Nitzschia umbonata* (Ehr.) L.-B.; *Navicula veneta* Kütz., qui ne prolifère qu'à la sortie du 5e bassin, semble une espèce moins tolérante. Cet essai de classement de taxons de Diatomées d'eau douce considérés comme très résistants pourrait permettre un diagnostic plus nuancé des milieux polysaprobies.

The organically loaded waters (BOD₅ : 69 to 184 mg O₂/l) of a sewage treatment plant with macrophytes (Doische, Belgium) are mainly colonized by ten diatom taxa, which are known as characteristic of polysaprobic conditions. Repeated observations, – every three weeks from 19 May to 4 October 1993 –, of the substrate re-settling by diatoms, the order of appearance and proliferation of the taxa along the decreasing BOD₅-gradient down the five pools of the sewage plant display a grading in their resistance. *Nitzschia capitellata* Hust. markedly and regularly dominates upstream and looks here as the most resistant taxon; down the second pool can be found the group of *Nitzschia palea* (Kütz.) W.Sm., *Navicula saprophila* L.-B., *Gomphonema parvulum* f. *saprophilum* L.-B. & Reichardt, *Navicula atomus* v. *permitis* (Hust.) L.-B. and, less abundant, *N. molestiformis* Hust.; down the third pool proliferate *Navicula accomoda* Hust., *N. subminuscula* Manguin and *Nitzschia umbonata* (Ehr.) L.-B.; *Navicula veneta* Kütz., appearing only down the fifth pool, seems slightly less tolerant. This classification of some of the most resistant freshwater diatom taxa could enable a more refined diagnosis of polysaprobic waters.

LE GENRE GOMPHONEIS : UN NOUVEAU MODÈLE D'ORGANISATION DU CINGULUM

The genus Gomphoneis : A new model of the cingulum organization

R. LE COHU*, M. COSTE**

*Laboratoire d'Hydrobiologie, Université Paul Sabatier, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex, France
**CEMAGREF, 50 avenue de Verdun, BP 3, 33611 Gazinet Cedex, France

La structure de la valve et l'organisation du cingulum chez une Diatomée se rapportant au complexe *Gomphoneis herculeana-minuta* ont été étudiées au microscope électronique et accessoirement au microscope photonique. L'ultrastructure présente les caractéristiques suivantes : stries constituées d'une double rangée d'aréoles, champ apical de pores différenciés structurellement des aréoles des stries et présence d'une lame axiale de silice responsable de deux lignes longitudinales visibles au microscope optique. La partie intérieure de la valvocopula simule la présence d'une lame marginale siliceuse. Un nouveau modèle d'organisation du cingulum, différent du modèle classique, est présenté. La valvocopula est une bande fermée avec un septum connectif à chaque extrémité. Les copulae, également munies d'un septum connectif, sont des bandes ouvertes, leurs ouvertures se plaçant alternativement aux pôles opposés de la valve. Tous les septa possèdent, sur la face advalvaire, une lame saillante qui s'insère sous les pseudosepta de la valve ou le septum d'une bande cingulaire. Les deux premières copulae s'emboîtent chacune sur un des septa de la valvocopula; la troisième copula se fixe sur la première copula et la quatrième copula sur la seconde copula.

The valvar structure and the cingulum arrangement of a diatom related to the *Gomphoneis herculeana-minuta* complex were investigated with electron microscopy and with light microscopy. Ultrastructural features include striae composed of double rows of puncta, apical pores field composed of pores structurally differentiated from the puncta, presence of an axial plate responsible for the image of longitudinal lines as seen with light microscope. The pars interior of the valvocopula resembles a marginal lamina of silica. A new model of the cingulum organization, quite different from the classical model, is proposed. The valvocopula is a closed band with a connective septum at both the headpole and footpole. The copulae, each of them with a connective septum, are open bands, their openings located at alternate poles. All the septa possess on the advalvar face a projecting lamina which fits under the pseudosepta of the valve or the septum of a girdle band. The two first copulae are directly connected with the opposite septa of the valvocopula. The third copula is attached to the first copula and the fourth copula to the second copula.

MISE AU POINT D'UN INDICE DIATOMIQUE PRATIQUE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'Aa (NORD DE LA FRANCE)

Elaboration of a practical diatom index in the River Aa Basin (northern France)

J. PRYGIEL*, L. LEVEQUE** & R. ISERENTANT***

* Agence de l'Eau Artois-Picardie, 764 bd Lahure, 59508 Douai Cedex, France

** U.S.T. Lille, Lab. d'Ecologie Numérique, 59655 Villeneuve-d'Ascq Cedex, France

*** Université Catholique de Louvain-la-Neuve, Lab. d'Ecologie & Biogéographie, place Croix-du-Sud, 1398 Louvain-la-Neuve, Belgique

L'Aa et ses affluents ont fait l'objet d'une série de campagnes en 1989-1990, en vue de réaliser un bilan de qualité de l'eau. L'I.P.S. ou Indice de Pollusensibilité Spécifique (Coste & Ayphassorho, 1991) a ainsi été appliqué à 86 échantillons et a permis d'établir une carte de qualité hydrobiologique. De nouvelles campagnes étant à réaliser pour vérifier l'efficacité d'outils épuratoires récemment mis en place lors du contrat de rivière Aa-Audomarois, le bassin versant de l'Aa a été retenu pour la mise au point d'un indice diatomique pratique. L'objectif est de disposer d'un outil utilisable en routine par des services gestionnaires de la qualité des eaux ne disposant pas *a priori* de connaissances poussées en systématique des Diatomées. Plusieurs listes d'espèces identifiées comme responsables de corrélations médiocres entre I.P.S. et I.D.G. (Indice Diatomique Générique de Coste & Ayphassorho, 1991), ont été dressées en fonction des écarts observés. Le principe de l'indice pratique repose sur des déterminations au genre avec, dans certains cas, des déterminations à l'espèce. Une liste de 42 espèces faciles à identifier en microscopie photonique parmi les 242 espèces initiales a été arrêtée. L'indice diatomique pratique ainsi proposé permet d'obtenir des résultats très proches de l'IPS, considéré comme indice de référence ($r = 0,994$ pour $n = 86$). Appliqué à l'ensemble des relevés du bassin Artois-Picardie (plus de 500 relevés), l'indice diatomique pratique comporte actuellement 26 genres et 57 espèces. Des tests restent à réaliser.

In 1989-1990 a series of surveys was carried out on the Aa and its tributaries in order to obtain a realistic assessment of the water quality. The Specific Pollution Sensitivity Index (IPS - Coste & Ayphassorho, 1991) was applied to 86 samples and enabled the drawing up of a hydrobiological quality map. As new surveys are to be carried out to verify the efficiency of purification works recently installed in the framework of the Aa-Audomarois River Contract, the Aa Basin was chosen for the elaboration of a practical diatom index. The aim is to design a tool to be used as a matter of routine by water quality management services which do not necessarily possess advanced knowledge in diatom systematics. Several lists of species identified as responsible for poor correlations between IPS and IDG (Generic Diatom Index - Coste & Ayphassorho, 1991) were drawn up function of the observed discrepancies. The principle of the practical index is that of genera determination and, in certain cases, species determination. Among the 242 initial species, a list of 42 species has been retained which are easily identified by optical microscopy. The results obtained with the proposed practical diatom index are very close to the IPS, considered as reference index ($r = 0,994$ with $n = 86$). Applied to the whole samplings in the Artois-Picardie Basin (over 500), the practical diatom index at present comprises 26 genera and 57 species. Tests are still to be carried out.

DIATOMÉES ENKYSTÉES DE SÉDIMENTS PROFONDS SUBANTARCTIQUES ET REVIVISCENCE

Encysted diatoms from deep Subantarctic sediments and revival

C. RIAUX-GOBIN

CNRS, URA 117, Laboratoire Arago, 66650 Banyuls-sur-Mer, France

Pendant la mission océanographique ANTARES I (avril-mai 1993) en zone subantarctique (Zone Frontale de convergences, entre les îles Crozet et Kerguelen et «POOZ» au Sud-Ouest de Kerguelen et Heard) des Diatomées enkystées de sédiments profonds ont été récoltées et étudiées. Un carottier multitube a été utilisé pour ces échantillonnages profonds, permettant ainsi l'étude d'interfaces eau/sédiment non perturbés. La biomasse pigmentaire microphytique a été mesurée par spectrofluorimétrie («Chl» *a*, *b*, *c* et phéopigments associés), des tests de fluorescence naturelle ont également été réalisés, en parallèle à la détection de microphytes enkystés (principalement des Diatomées, SEM); ces méthodes ont été appliquées tant sur les sédiments que sur les «fluffs» quand ils étaient présents. Les stations de prélèvement situées les plus au Sud (50-55°S, 56-75°E; 3600-4700 m de profondeur) étaient les plus riches en cellules enkystées (Diatomées appartenant principalement au genre *Chaetoceros*). Ceci étant relié à la présence d'un «fluff» composé de frustules détritiques en très bon état de conservation et appartenant à divers genres, dont *Chaetoceros*, *Corethron* et *Rhizosolenia*. Les tests de reviviscence, effectués sur milieu de culture F/2, ont été positifs pour ces stations, générant des assemblages diatomiques paucispécifiques, dominés par les genres *Chaetoceros* et *Nitzschia* (principalement *Chaetoceros* cf. *neglectum* et plusieurs *Nitzschia* dont *N. kerguelensis*). Les évolutions temporelles des concentrations pigmentaires de ces cultures ont été suivies et comparées entre elles.

During the ANTARES I cruise (April-May 1993) in Subantarctic areas (Frontal Zone, between Crozet and Kerguelen islands and Permanently Open Ocean Zone, South-West of Kerguelen and Heard) encysted diatoms collected from deep sub-surface sediments have been studied. Sediment samples were collected by using a multiple gravity corer, which does not disturb the sediment-water interface. Microphytic biomass indicators («Chl» *a*, *b*, *c* and related phaeopigments, as measured by spectrofluorometry) and tests on natural fluorescence together with the detection of diatom cysts (Scanning electron microscopy) were carried out on both sediments and «fluffs» (whenever present). The Southern stations (50-55°S, 56-75°E; 3600-4700 m depth) were the most enriched with encysted microphytic cells (mainly belonging to the genus *Chaetoceros*). This was mostly related to the presence of a «fluff» composed of well preserved detritic frustules of diatoms belonging to various genera (among which delicate *Chaetoceros*, *Corethron* and *Rhizosolenia*). The revival tests (cultures on F/2 medium) were positive for these stations, leading to paucispecific diatom assemblages dominated by the genera *Chaetoceros* and *Nitzschia* (mainly *Chaetoceros* cf. *neglectum* and *Nitzschia kerguelensis*). Temporal changes in the pigment concentration and composition of these cultures were followed and compared among stations.

Directeur gérant de la publication : A. GUILLE

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays.

La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Printed in France

Dépôt légal 3^{ème} trimestre 1995

Commission paritaire n° 22217

Imprimerie Louis-Jean, 05002 GAP cedex — Dépôt légal 930 — Décembre 1995

Présentation générale de la publication : A. GUYOT

Les droits de traduction, d'adaptation et de reproduction sont réservés pour tous pays.
La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des articles 1 et 2 de l'article 41, b) de la loi, que les copies ou réimpressions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective - et, à titre d'exemple, à la diffusion de documents dans un but pédagogique ou d'information, ou à l'usage de la presse - le fait de reproduire ou de transmettre par quelque moyen que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit, est formellement interdite.
Toute représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituera un délit puni par l'article 425 et suivants du Code pénal.

Printed in France
Droits réservés
Commission nationale n° 2012

INSTRUCTIONS AUX AUTEURS

TEXTE

Les manuscrits, dactylographiés en double interligne sur le recto seulement des feuilles numérotées (ne pas excéder 20 pages) sont présentés en trois jeux complets, sous leur forme définitive.

Le titre du manuscrit doit être le plus court possible; il est suivi du prénom et du nom de l'auteur (ou de chacun des auteurs) ainsi que de l'adresse (ou des adresses) du Laboratoire dans lequel a été effectué le travail.

Chaque manuscrit comportera :

- un résumé en français de 15 lignes maximum figurant en début d'article, suivi de sa traduction en anglais,
- des mots clés français et anglais (6 au maximum) permettant un traitement rapide par les revues analytiques,
- un titre abrégé pour haut de page (60 signes et espaces au plus),
- la traduction anglaise du titre de l'article,
- une liste hors-texte des légendes des illustrations et leur traduction en anglais,
- une liste hors-texte des légendes des tableaux numérotés en chiffres romains et traduites en anglais.

Les noms scientifiques (genres, espèces, sous-espèces) figurent en italiques ou soulignés d'un seul trait.

Les références bibliographiques des auteurs cités dans le texte sont regroupées à la fin du manuscrit dans l'ordre alphabétique des noms d'auteurs; elles doivent être conformes aux modèles suivants :

GRIFFITHS C.L. and J.A. KING, 1979. Some relationships between size, food availability and energy balance in the Ribbed Mussel *Aulacomya ater*. *Mar. Biol.* **51** (2) : 141-150.

EAGLE R.A. and P.A. HARDIMAN, 1977. Some observations on the relative Abundance of species in a benthic community. In *Biology of Benthic Organisms*. Edited by B.F. Keegan, P.O. Ceidigh and P.J.S. Boaden, Pergamon Press, Oxford-New York, 197-208.

Le titre des périodiques doit être abrégé d'après les règles internationales (World list of Scientific Periodicals).

Les notes infrapaginales et les remerciements seront aussi brefs que possible.

ILLUSTRATIONS

Les figures au trait doivent être exécutées à l'encre de chine sur papier calque assez fort, bristol, carte à gratter, papier millimétré bleu. Il est exigé des lettres et chiffres « transfert » par caractères autocollants pour le lettrage et la numérotation, dont la taille tient compte de la réduction à supporter. Les figures sont regroupées au maximum en planches dont la justification pleine page est 17 x 24,35 cm une fois réduites (penser à retrancher la légende de ces dimensions); largeur d'une colonne : 8,1 cm. Méthode des « rectangles homologues » pour la réduction : tracer les diagonales d'un rectangle de 17/24,35 cm, les prolonger; tout rectangle admettant ces prolongements comme diagonales correspondra à la justification après réduction. Indiquer le numéro d'ordre des figures en chiffres arabes et le nom de l'auteur au crayon bleu au recto ou au dos. Ne pas inscrire de légende sur les illustrations.

Regrouper les similis (photographies, lavis...) en planches. Employer une échelle graphique qui sera réduite avec la figure, et un lettrage par transfert. Tableaux et planches similis sont numérotés de I à N en chiffres romains. Limiter le nombre des tableaux et ne retenir que ceux qui sont indispensables à la compréhension du travail.

La revue publie gratuitement 2 planches au trait pleine page et 1 seule planche en simili; les illustrations supplémentaires ou en couleurs sont facturées aux auteurs.

ÉPREUVES ET TIRÉS À PART

Un jeu d'épreuves accompagné du manuscrit est envoyé à l'auteur qui doit retourner l'ensemble après correction et indication de la place des illustrations dans le texte, dans un délai maximum de 15 jours.

Les tirages à part, facturés directement par l'imprimeur, doivent être commandés dès réception de l'imprimé spécial joint aux épreuves.

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

TEXT

The manuscript should be typed double-spaced on one side of white paper, format A4, pages numbered (max, 20 pp), and sent in definitive form, in triplicate, to the editor.

The title of the paper should be as concise as possible; it is followed by the first and second name of the author(s) and address of the laboratory at which the work was done. Each manuscript should include :

- a french summary of 15 lines max., followed by the english translation,
- key words in french and english (6 max.) allowing treatment by abstracting journals,
- short version of title (60 signs and spaces max.),
- english translation of the full title,
- a separate list of figure legends in english and french,
- a separate list of numbered tables with their legends in english and scientific names (genera, species, sub-species) should be written in italics or underlined once.

References of papers cited in the text should be listed at the end of the manuscript in alphabetical order, according to the following models :

GRIFFITHS C.L. and J.A. KING, 1979. Some relationships between size, food availability and energy balance in the Ribbed Mussel *Aulacomya ater*. *Mar. Biol.* **51** (2) : 141-150.

EAGLE R.A. and P.A. HARDIMAN, 1977. Some observations on the relative abundance of species in a benthic community. In *Biology of Benthic Organisms*. Edited by B.F. Keegan, P.O. Ceidigh and P.J.S. Boaden, Pergamon Press, Oxford-New York, 197-208.

The title of a journal must be abbreviated according to the rules set by the World list of Scientific Periodicals.

Footnotes and acknowledgments should be as brief as possible.

ILLUSTRATIONS

Line drawings should be prepared with India ink on heavy tracing paper, bristol board, white drawing-cardboard or graph paper (blue grid). Letters and numbers on figures should be large enough to be easily readable after reduction; use letter transfer equipment. As far as possible, figures should be grouped in plates of 17 x 24.35 cm final size (generally the explanations are included in this frame); the width of a single column is 8.1 cm. Prepare figures using the "homologous rectangles" rule; indicate the number of the figure and the author's name with blue pencil on the back of the figure. Do not write explanations on the figure.

Photographs and half-tone drawings must always be grouped as plates. Scale bars are reduced with the figures. Number plates and tables in roman numbers on the back. Limit total number of tables to an absolute minimum of items indispensable for clear presentation.

The journal publishes free of charge two plates with line drawings and one plate of half-tone figures per article. Additional illustrations and colour plates are charged to the author(s).

GALLEY-PROOFS AND REPRINTS

One set of galley-proofs is sent with the manuscript to the author(s); both proofs and manuscript must be returned to the editor with indications on indispensable corrections and insertion of figures within two weeks.

Reprints can be ordered by using the form enclosed with the galley-proofs.

SOMMAIRE – SUMMARY

Avant propos		177
Les Diatomées et le diagnostic de la qualité des eaux courantes continentales : les principales méthodes indicielles <i>Diatoms and the diagnosis of the quality of continental running waters : the main index-based methods</i>	J. PRYGIEL, M. COSTE	179
Application d'indices chimique et diatomique de la qualité des eaux courantes utilisant les peuplements de Diatomées d'une station d'épuration par lagunage à macrophytes-microphytes (Doische, prov. Namur, Belgique) <i>Chemical and diatomological indices of running water quality applied to the Diatoms communities of a wastewater treatment plant using reconstructed wetlands (Doische, prov. Namur, Belgium)</i>	L. LECLERCQ	187
Morphogénèse et croissance de la Diatomée marine <i>Phaeodactylum tricornutum</i> en cultures continues dialysante et non dialysante <i>Morphogenesis and growth of the marine Diatom Phaeodactylum tricornutum in continuous dialysis and non-dialysis (chemostat) cultures</i>	P. MARSOT, K. MOUHRI	199
Impact de la station d'épuration (STEP) de Neuchâtel (Suisse) et surveillance de l'épipélon littoral du lac <i>Impact of the sewage purification plant of Neuchâtel (Switzerland) and observation of the littoral epipelon of the lake</i>	F. STRAUB, M. GLAUSER	207
The effects of salinity, light and temperature on <i>Gyrosigma</i> spp.	G. REID	215
Effets des métaux lourds (Cd, Hg) sur les communautés de Diatomées périphytiques développées sur substrats artificiels en microcosmes <i>Effects of heavy metals (Cd, Hg) on periphytic diatom communities using artificial substrates in microcosms</i>	F. PÉRES, M. COSTE, M. RICARD, A. BOUDOU, F. RIBEYRE	219
Le diagnostic de noyade par la recherche et l'identification des Diatomées : intérêt d'une extraction tissulaire par digestion enzymatique <i>The diagnosis of drowning based on diatom study and identification : interest of a tissular extraction by enzymatic digestion</i>	LUDES, M. COSTE, P. MANGIN	231
Mise en évidence d'une fluctuation climatique d'après les Diatomées quaternaires du Maar de Vico (Italie Centrale) <i>Evidence of a climatic fluctuation based on the quaternary diatoms of Vico maar lake (Central Italy)</i>	I. MERGEAI	235
Diatoms from the archeological site, « Le Grand Marais », Champagne-sur-Oise, France	K.K. SERIEYSSOL, V. KRIER	243
Inventory of the Diatom Flora of the NW Mediterranean Sea	Z.R. VELASQUEZ, A. CRUZADO	249
Diatoms from La Trinitat salt works, Ebre Delta (Spain). Some considerations about <i>Amphora hyalina</i> Kütz V. MERINO, E. CLAVERO, J. GRIMALT, M. HERNANDEZ-MARINÉ		265
Faut-il encore séparer <i>Stephanodiscus parvus</i> Stoermer & Hakansson de <i>Stephanodiscus minutulus</i> (Kütz.) Cleve & Möller? <i>Is it yet necessary to separate Stephanodiscus parvus Stoermer & Hakansson from Stephanodiscus minutulus (Kütz.) Cleve & Möller?</i>	C. CORNET, J. SUBIRES	273
<i>Coscinodiscus dispar</i> Peragallo & Héribaud	K.K. SERIEYSSOL	279
Contribution à l'étude taxonomique des Diatomées. Reconnaissance du vivant <i>Contribution to diatom taxonomy. Recognition of the living condition</i>	J. BERTRAND	283
Diatomées de quelques écoulements saumâtres de Lorraine <i>Brackisch diatoms from Lorraine</i>	J.-F. PIERRE	295
Les utilisations des Diatomées <i>Utility of diatoms</i>	J. VIZINET, B. DE REVIERS	301
Essai de typologie des peuplements diatomiques des sources (Table ronde) <i>A trial of typology of Diatom assemblages of springs (Round Table)</i>	A. CAZAUBON, R. ROLLAND	315
Croissance des Diatomées en laboratoire et méthodologies (Table ronde) <i>Laboratory culture methods for growth of diatoms (Round Table)</i>	P. MARSOT	321
Fragmentation et dissolution des frustules de Diatomées : méthodes de comptage pour apprécier l'état de conservation des assemblages fossiles (Table ronde) <i>Breakage and dissolution of diatoms frustules : counting methods to estimate the conservation state of fossil assemblages (Round Table)</i>	F. STRAUB, C. CORNET	327
Abstracts		337