



HAL
open science

LES UTILISATIONS DES DIATOMÉES

J Vizinet, B de Reviers

► **To cite this version:**

J Vizinet, B de Reviers. LES UTILISATIONS DES DIATOMÉES. Vie et Milieu / Life & Environment, 1995, pp.301-314. hal-03052760

HAL Id: hal-03052760

<https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-03052760>

Submitted on 10 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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 ostearia*, 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 les 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). Fossils 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 ostrearia*, 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 nitrrique) 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 Botryococcacées (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 qualitative 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 & Tekaiia, 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'agrégats, 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 : paleoecological 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