

De l'action de quelques agents polluants sur la croissance et le métabolisme du phytoplancton marin

par Michel PENOT (*)

Dans les conditions naturelles, les équilibres entre les différentes espèces obéissent à des lois où une pluralité de facteurs et d'interactions se manifestent (lumière, température, interactions entre individus), ce qui conduit au maintien d'un équilibre écologique entre les différentes espèces. Bien entendu, dès l'instant où l'homme développe une nouvelle activité, crée une nouvelle industrie, il introduit le plus souvent, dans le milieu naturel, un facteur nouveau qui vient troubler ces équilibres et il est évident que l'activité humaine augmentant, le nombre de facteurs, causes de pollution, croît parallèlement. Les espèces phytoplanctoniques sont donc soumises à ces pollutions comme les autres organismes. L'intérêt des études menées sur le phytoplancton tient au fait que celui-ci représente non seulement le premier maillon de la chaîne alimentaire, mais aussi un des premiers agents d'une accumulation de ces facteurs de pollution. Les recherches, menées au niveau de ces micro-organismes, permettent donc de donner le premier signal d'une perturbation écologique, en conséquence (du moins en théorie) d'intervenir contre le facteur de pollution, contribuent enfin sur le plan fondamental, à mieux comprendre, de par les perturbations apportées, le fonctionnement cellulaire normal.

PRINCIPALES SOURCES DE POLLUTION

Il y a une pluralité de causes de pollution du milieu marin qu'on peut rappeler, sans vouloir les hiérarchiser et qui sont :

— PARMIS LES AGENTS CHIMIQUES : les rejets de *matières organiques*, riches en substances azotées, enrichis en détergents ; les *effluents industriels* avec des métaux tels que le plomb (Pb), le mercure (Hg), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le nickel (Ni) (1), des halogènes : chlore (Cl), fluor

(*) Laboratoire de Physiologie Végétale - Faculté des Sciences et Techniques, Université de Bretagne Occidentale - 29283 Brest Cedex.

(1) Quelques chiffres : le taux de Cadmium est de 0,1 µg/l dans les eaux non polluées ; il passe à quelques µg dans les eaux polluées. En 50 ans le taux de Plomb a quadruplé dans l'hémisphère Nord (il est passé de 0,015 µg à 0,070 µg/kg d'eau de mer).

(F) ; les *rejets de l'agriculture* tels que les engrais (nitrates) mais aussi les pesticides (insecticides, herbicides, fongicides, acaricides, etc...) ; les *hydrocarbures* libérés soit à la suite de catastrophes de tankers, soit par l'exploitation et l'utilisation de ces hydrocarbures (2) ; des *polluants plus spécifiques*, par exemple le rejet de chlore (hypochlorite) associé au nettoyage des canalisations de centrale nucléaire.

— DES FACTEURS PHYSIQUES, tels qu'une pollution thermique.

— UNE POLLUTION RADIOACTIVE très souvent décriée, mais qu'il vaudrait mieux ramener à une plus juste dimension ; elle ne représente pas, aujourd'hui, le facteur de pollution le plus élevé.

A cela peuvent s'ajouter des effets cumulatifs et/ou synergiques entre les différents facteurs simultanément présents en un même lieu.

EVOLUTION DU POLLUANT DANS LE MILIEU

Dès l'instant où un polluant est rejeté dans le milieu, il est soumis au jeu des diverses interactions du milieu : physiques, chimiques, biologiques, etc...

Après la dispersion qui lui permet d'atteindre tous les organismes, une des premières manifestations qui caractérise le polluant est souvent son accumulation, sa concentration dans les organismes vivants. On cite classiquement l'exemple du D.D.T., puissant insecticide organochloré qui s'accumule ainsi le long de la chaîne alimentaire (TABLEAU I). On cite aussi le cas de l'accumulation de l'arsenic avec des facteurs de concentration allant de 1 000 à 10 000 (KLUMPP, 1980).

TABLEAU I. — Accumulation du DDT dans les organismes vivants et facteur de concentration.

Eau des estuaires	Plancton	Poisson
1 ppb	70 ppb	15 ppm
1	70 x	15 000 x

ppb : parties par billion (= milliard) : 1.10^{-9} (= 1 $\mu\text{g/kg}$).

ppm : parties par million : 1.10^{-6} (= 1mg/kg).

Indépendamment de cela, l'agent chimique subit l'action du métabolisme des organismes vivants qui peut aller soit dans le sens d'une *toxicité accrue* ; on cite l'exemple du mercure qui, méthylé par certaines bactéries marines, devient ainsi sous forme de méthyl-mercure beaucoup plus toxique que le mercure seul (Fig. 3) ; soit dans le sens d'une *toxicité diminuée* : par exemple, l'arséniate très toxique est converti, par de nombreuses algues, en arsenite, ou mieux incorporé dans des composés organiques neutres non toxiques (BLASCO *et al.*, 1981).

De même, la toxicité des hydrocarbures diminue avec le temps, soit après photo-oxydation (processus chimique), soit après biodé-

(2) Les rejets à la surface des mers atteindraient, pour 1980, 5.10^6 t/an.

gradation (ces hydrocarbures sont transformés par les micro-organismes en acides aminés et convertis en protéines) (NOUNOU, 1979).

PRINCIPAUX EFFETS INDUITS PAR LES POLLUANTS

Il est hors de question de vouloir traiter tous les aspects de la pollution, toutes les déviations métaboliques imposées, mais simplement de donner une idée de la diversité des effets et des moyens de les étudier.

ACTION SUR LA CROISSANCE

La Figure 1, empruntée au travail de SAIFULLAH (1978), illustre les effets inhibiteurs du cuivre sur la croissance de divers Dinoflagellés marins : on voit que le retard est d'autant plus important que la dose est plus élevée. Mais il est évident qu'un retard de croissance n'est que le reflet global de perturbations cumulées qui peuvent se situer à différents niveaux du métabolisme cellulaire et c'est ce que dans un deuxième temps il paraît intéressant de pouvoir préciser. Quelles sont les principales fonctions atteintes ? Quel est le(s) niveau(x) d'impact de l'agent polluant ? Les quelques exemples qui suivent essayeront d'y répondre, au moins partiellement.

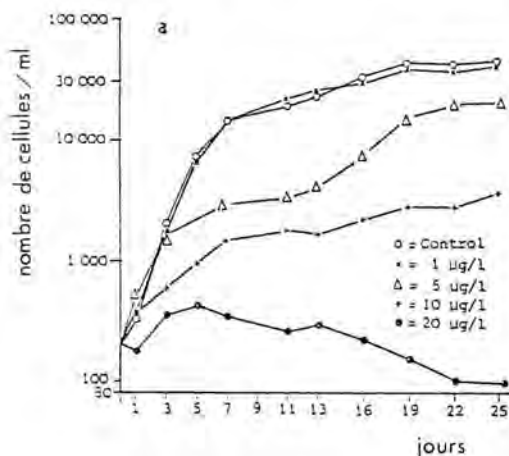


Fig. 1. — Influence du cuivre sur la croissance d'un Dinoflagellé marin (*Scrippsiella*). On notera que l'effet est d'autant plus marqué que la concentration dans le milieu est plus élevée (d'après SAIFULLAH, 1978).

ACTION AU NIVEAU DE LA MEMBRANE ET DE L'OSMORÉGULATION

L'une des principales propriétés de la membrane cellulaire est sa semiperméabilité qui permet à toute cellule d'absorber ou de rejeter de l'eau, en fonction des variations de la pression osmotique du milieu. Un travail récent fait par RIISGARD (1979) est intéressant à cet égard, et porte sur l'effet du cuivre. L'étude est faite sur une algue unicellulaire, euryhaline, *Dunaliella marina*. Cette algue a la particularité de bien supporter les variations de pression osmotique du milieu en modifiant d'une part sa perméabilité à l'eau (processus rapide : quelques minutes) puis en réajustant par voie métabolique sa pression osmotique interne (régulation par modification du taux interne de glycérol). Dans les conditions

habituelles (de non pollution : Figure 2 A), l'algue contrebalance les variations osmotiques en modifiant sa perméabilité à l'eau qui conduit soit à une augmentation du volume cellulaire en cas de choc hypotonique, soit à une diminution du volume, en cas de choc hypertonique. Le retour à l'équilibre s'effectue ensuite lentement (50-60 mn). Mais dans un milieu pollué par le cuivre, l'algue perd cette propriété de réajustement (Fig. 2B). L'intérêt de ce travail, outre les aspects fondamentaux qu'il évoque, est de nous proposer un système de détection simple et rapide d'une pollution par le cuivre.

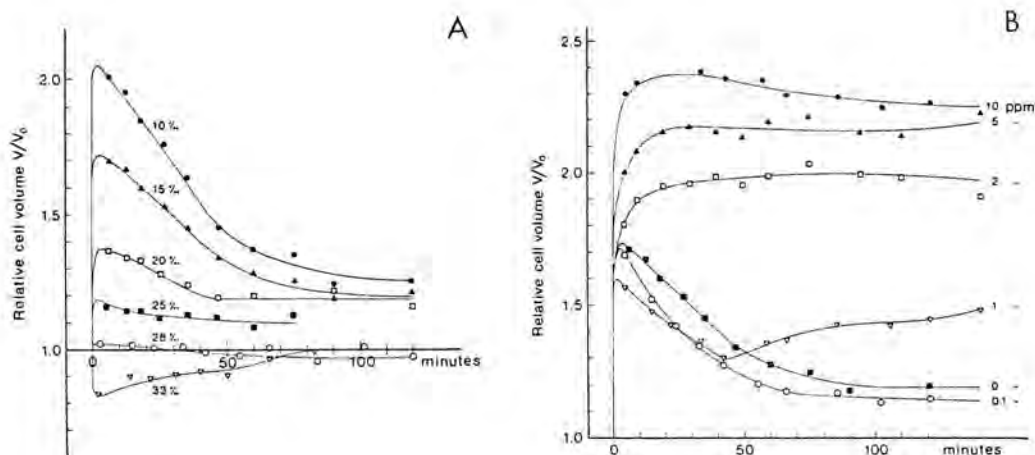


Fig. 2. — Modification du volume cellulaire chez *D. marina*, après un choc osmotique, soit hypotonique, soit hypertonique (2 A) et effet perturbateur du Cu sur cette régulation (2 B). On notera que la cellule réagit très rapidement (quelques minutes) au changement de milieu. Le milieu de référence est à 28 ‰ (d'après RIISGAARD, 1979).

DÉSÉQUILIBRE DE LA BALANCE IONIQUE

Le maintien d'une balance ionique équilibrée est la condition nécessaire au bon fonctionnement de la cellule. Divers métaux ou composés chimiques sont capables de modifier cet équilibre. OVERNELL (1975) a fait à cet égard une étude comparée de l'action de quelques polluants (zinc, cadmium, mercure, méthyl-mercure, plomb, cuivre et DCMU ; ce dernier est un dérivé de l'urée qui inhibe la photosynthèse), sur les fuites ioniques et sur la photosynthèse.

Les résultats (Fig. 3) sont assez instructifs qui montrent que le cuivre et le méthyl-mercure provoquent une fuite de potassium (notons à cet égard la grande toxicité du méthyl-mercure par rapport à celle du mercure seul).

L'auteur montre d'autre part que le cuivre doit entraîner en premier lieu une dénaturation des membranes, avant d'affecter la photosynthèse (les doses inhibitrices sont en effet différentes pour les 2 processus étudiés).

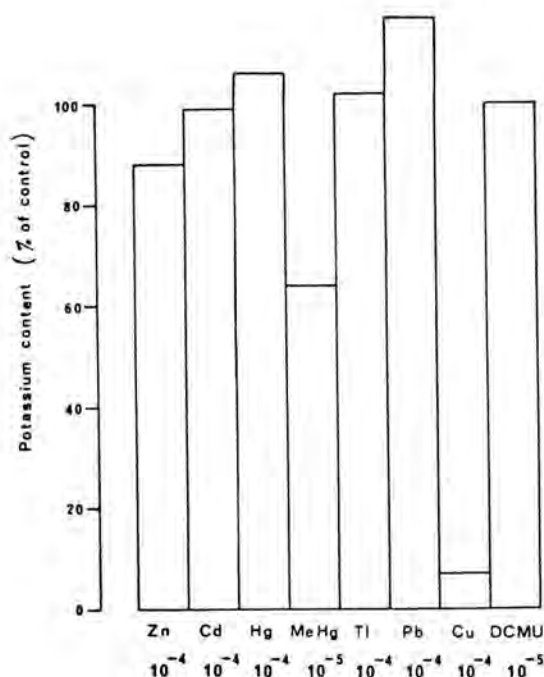


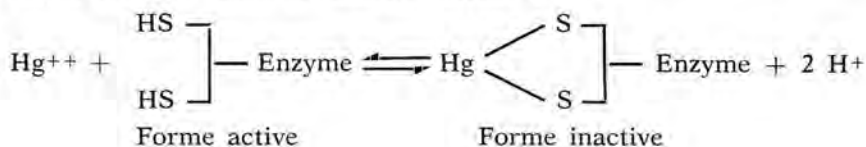
Fig. 3. — Effet de quelques métaux sur la balance ionique de *Dunaliella tertiolecta* (ici la teneur en K en % par rapport aux témoins non pollués). A noter les effets perturbateurs du Cu^{++} et du méthyl-Hg (d'après OVERNELL, 1975).

ACTION AU NIVEAU DU MÉTABOLISME

De nombreux travaux montrent que le métabolisme de l'algue est diversement atteint par l'action des polluants. C'est ainsi :

- que le cuivre, de nombreux pesticides diminuent le taux de fixation du C, donc la photosynthèse (SAIFULLAH, 1978 - Fig. 4) ;
- que le métabolisme du phosphore est au moins momentanément bloqué par le chlore rejeté dans le milieu marin (VIDEAU *et al.*, 1980 - Fig. 5) ;
- que les hydrocarbures agiraient préférentiellement sur la photosynthèse et sur la photorespiration, au moins chez *Pavlova lutheri* (v. LAMBERT-CASTEL et PENOT, 1982).

La plupart de ces effets peuvent s'interpréter en termes d'une action soit au niveau de l'organisation des membranes (désorganisation des constituants phospholipidiques par les hydrocarbures par exemple), soit au niveau des flux d'électrons qui accompagnent de nombreuses réactions métaboliques (respiration, photosynthèse), soit enfin au niveau des enzymes impliquées dans ces processus. On admet par exemple que de nombreux métaux lourds bloqueraient le fonctionnement des enzymes par liaison au niveau des groupements -SH de l'enzyme ; l'enzyme passerait ainsi sous une forme inactive selon le schéma suivant :



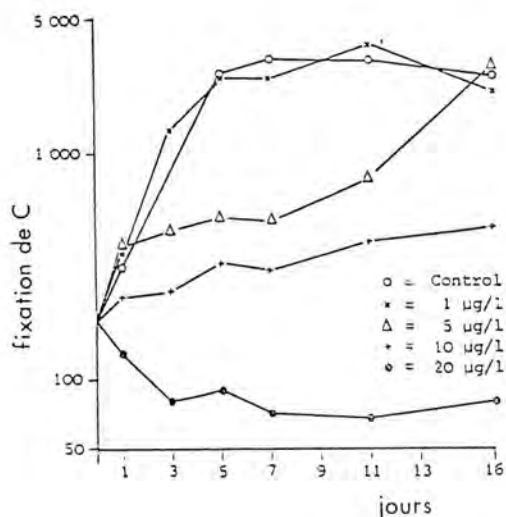


Fig. 4. — Effet du cuivre sur la fixation de carbone radioactif chez *Scrippsiella faeroense* (Dinoflagellé marin) (d'après SAIFULLAH, 1978).

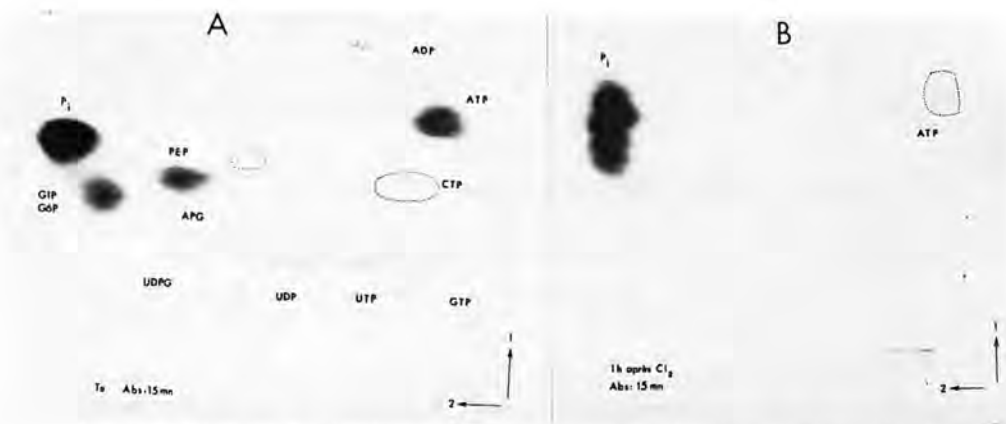


Fig. 5. — Action de la chloration sur le métabolisme du phosphore chez *Dunaliella primolecta*. A : témoin - B : 1 heure après la chloration. Toutefois, 24 heures après la chloration, les algues ont retrouvé une partie de leur métabolisme normal.

ACTION SUR LE MATÉRIEL GÉNÉTIQUE ET LA MORPHOGENÈSE

Au-delà des effets qui se situent plus particulièrement au niveau des perturbations physiologiques, d'autres manifestations peuvent également s'exprimer au niveau de la division, de la morphogenèse et/ou de l'hydrodynamisme cellulaires. Le lindane, puissant insecticide, perturberait, selon PUISEUX-DAO (1981), ces trois manifestations en agissant vraisemblablement au niveau des ultrastructures cellulaires telles que les microtubules, les microfilaments, le réseau microtrabéculaire, toutes formations impliquées dans les trois processus précédemment évoqués. De même, il a été montré que le même agent perturberait le métabolisme des acides nucléiques au moins chez l'Acétabulaire (BORCHI *et al.*, 1973). Enfin, on a émis aussi l'idée d'une action des polluants au niveau des chromosomes et/ou du fuseau (RIVKIN, 1979).

CONCLUSIONS

J'ai essayé de souligner par ces quelques exemples la diversité des actions et aussi la complexité des études qui visent à mieux comprendre, donc à mieux maîtriser les effets des polluants. Je voudrais au moment de conclure essayer de dégager quelques idées et/ou points importants qui me paraissent découler de ces études :

L'effet obtenu est avant tout proportionnel à la dose de polluants dans le milieu ; plus le polluant est abondant, plus la perturbation mesurée est grande ;

L'ampleur des effets dépend de la nature chimique du polluant ; c'est ainsi que pour prendre un exemple avec les métaux le degré de toxicité irait en diminuant depuis le mercure au chrome :

— mercure >> cuivre > plomb > zinc > chrome.

La perturbation mesurée, donc la toxicité du polluant dépend de l'espèce, de sa nature, de son métabolisme, de son degré d'organisation, mais aussi, pour une même espèce, du polluant. C'est ainsi que *Dunaliella* et *Phaeodactylum* sont sensibles respectivement à 0,4 ppm et 0,6 ppm (3) (DL 50) d'hypochlorite, tandis que *Monochrysis* présente la même réduction de la croissance à 4 ppm (VIDEAU *et al.*, 1979). Par contre, parmi ces trois espèces phytoplanctoniques, c'est *Monochrysis* qui apparaît comme l'espèce la plus sensible aux hydrocarbures (CASTEL, 1981). Dans le cas du zinc, la croissance de *Skeletonema* serait perturbée à 25 µg.l⁻¹, (soit 1 000 fois plus ; JENSEN *et al.*, 1974). On voit donc par ces exemples que la structure cellulaire n'est pas seule en cause dans la réponse de l'espèce ; s'y ajoutent le métabolisme propre de l'algue, sa sensibilité et probablement la vitesse de pénétration du polluant, toutes choses sur lesquelles on a peu d'informations précises.

Cette sensibilité différente des espèces peut conduire à un déséquilibre écologique, telle espèce, plus résistante, finissant par être la seule présente dans le milieu ; c'est ce que THOMAS et SEIBERT (1977) ont montré dans le cas d'une pollution où le genre *Nitzschia* finit par dominer sur toutes les autres espèces phytoplanctoniques (Fig. 6).

Les interactions entre les agents polluants et les agents du milieu, chimiques ou physiques, peuvent conduire soit à une amplification, soit à une atténuation de la toxicité. De nombreux exemples étayeraient cela, je n'en citerai que deux. La sensibilité au chlore est accrue chez *Dunaliella*, à la lumière, elle est atténuée à l'obscurité. D'autre part, la toxicité au chlore est accrue en présence d'ammonium dans le milieu, par suite de la formation de chloramines et de bromamines, plus toxiques pour la cellule que l'hypochlorite seul (VIDEAU, 1979).

Enfin pour terminer par une note un peu plus optimiste, on peut dire que dans certains cas, les effets ne sont ni durables, ni irréversibles ; un certain nombre d'espèces remises dans des milieux non pollués reprennent une croissance et une activité métabolique normales. D'autre part enfin, de nombreuses cellules développent, en présence de polluants, des réactions spécifiques

(3) DL 50 = dose létale pour 50 % de la population.

leur permettant soit d'éliminer (extrusion active, sequestration intrapariétale, élimination par réduction et volatilisation), soit de transformer les agents chimiques en des composés non toxiques pour la cellule (inactivation par chélation *in situ* ou piégeage dans des inclusions intracellulaires, etc...) (HALL *et al.*, 1979 ; DE FILIPPIS, 1979).

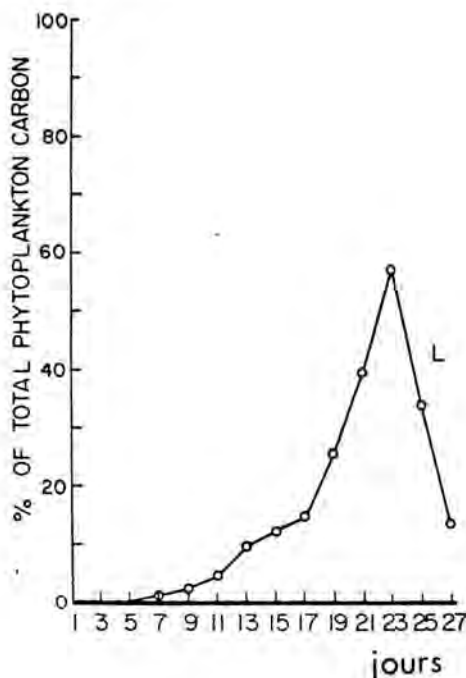


Fig. 6. — Effet du cuivre sur le phytoplancton marin. Evolution de *Nitzschia delicatissima* en % du phytoplancton total (d'après THOMAS et SEIBERT, 1977).

BIBLIOGRAPHIE

- AMANCIO S. (1976) - Modifications ultrastructurales provoquées par un herbicide le piclorame en formulation technique (70,4 %) chez une algue planctonique, le *Dunaliella bioculata* (Volvocales). *C. R. Acad. Sc. Paris*, 283 : 1337-1340.
- BENSON A.A., COONEY R.V. et HERRERA-LASSO J.M. (1981) - Arsenic metabolism in algae and higher plants. *J. of Plant Nutrition*, 3 (1-4) : 285-292.
- BLASCO F. (1976) - Etude des systèmes de transport du phosphate de *Candida tropicalis*. *Thèse de Doctorat d'Etat*, Marseille II, mai 1976, 179 p.
- BORCHI H., PUISEUX-DAO S. et HOURSANGOU-NEUBRUN D. (1973) - The effects of lindane on *Acetabularia mediterranea*. *Protoplasma*, 78 : 99-112.
- CASTEL F. (1981) - Influence des pétroles de l'*Amoco Cadiz* sur la croissance et certains aspects du métabolisme d'une algue phytoplanctonique : *Pavlova lutheri* (D) Green. *Thèse de 3^e Cycle*, septembre 1981, Brest 81 p.
- DE FILIPPIS L.F. (1979) - Non-enzymatic reduction of organomercurial salts in biological systems. *Bull. Environm. Contam. Toxicol.*, 23 : 848-854.
- HALL A., FIELDING A.J. et BUTLER M. (1979) - Mechanisms of copper tolerance in the marine fouling alga *Ectocarpus siliculosus*. Evidence for exclusion mechanism. *Marine Biology*, 54 : 195-199.
- JENSEN A., RYSTAD B. et MELSON S. (1974) - Heavy metal tolerance of marine phytoplankton. I. The tolerance of three algal species to zinc in coastal sea water. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 15 : 145-147.

- KLUMPP D.W. (1980) - Characteristics of arsenic accumulation by the seaweeds *Fucus spiralis* and *Ascophyllum nodosum*. *Marine Biology*, 58 : 257-264.
- LAMBERT-CASTEL F. et PENOT M. (1982) - Etude de l'action des pétroles de l'Amoco Cadiz sur la croissance et certains aspects du métabolisme d'une algue phytoplanctonique *Pavlova lutheri* (Droop) Green. *Actual Biochem. Mar.* (sous presse).
- NOUNOU P. (1979) - La pollution pétrolière des océans. *La Recherche*, 97, vol. 10 : 147-156.
- OVERNELL J. (1975) - The effect of heavy metals on photosynthesis and loss of cell potassium in two species of marine algae, *Dunaliella tertiolecta* and *Phaeodactylum tricornutum*. *Mar. Biol.*, 29 : 99-103.
- PUISEUX-DAO S. (1981) - Communication orale. Société d'Ecophysiologie, Paris.
- RIISGARD H.U. (1979) - Effect of copper on volume regulation in the marine flagellate *Dunaliella marina*. *Mar. Biol.*, 50 : 189-193.
- RIVKIN R.B. (1979) - Effects of lead on growth of the marine diatom *Skeletonema costatum*. *Mar. Biol.*, 50 : 239-247.
- SAIFULLAH S.M. (1978) - Inhibitory effects of copper on marine dinoflagellate. *Mar. Biol.*, 44 : 299-308.
- THOMAS W.H. et SEIBERT D.L.R. (1977) - Effects of copper on the dominance and the diversity of algae ; controlled ecosystem pollution experiment. *Bull. Marine Science*, 27 (1) : 23-33.
- VIDEAU C. (1979) - Toxicité d'une eau de mer chlorée vis-à-vis de l'algue phytoplanctonique *Dunaliella primolecta* Butcher, en relation avec la concentration en ions ammonium du milieu. Rapport EDF E/31/D.51.
- VIDEAU C. KHALANSKI M. et PENOT M. (1979) - Preliminary results concerning effects of chlorine on monospecific marine phytoplankton. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 36 : 111-123.
- VIDEAU C. KHALANSKI M. et PENOT M. (1980) - Physiological response to chlorination of the unicellular marine alga *Dunaliella primolecta* Butcher. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 47 : 113-126.