

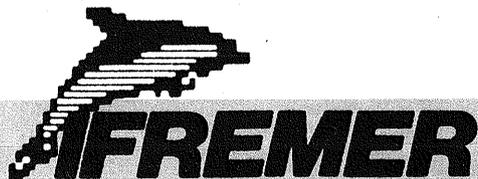
INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE
POUR L'EXPLOITATION DE LA MER
I F R E M E R
rue de l'Ile d'Yeu
B. P. n° 1049
44037 NANTES CEDEX

ALGUES UNICELLULAIRES MARINES :
COMPOSITION ET PROSPECTIVES

par Patrick LASSUS

X^{èmes} JOURNEES EUROPEENNES DE COSMETOLOGIE
PRODUITS MARINS ET PLANTES EN THERAPEUTIQUE
ET EN COSMETOLOGIE

27-28-29 Janvier 1986



LES ALGUES UNICELLULAIRES MARINES : COMPOSITION ET PROSPECTIVE INDUSTRIELLE

par Patrick LASSUS

IFREMER
B. P. 1049
rue de l'Ile d'Yeu
44037 NANTES CEDEX

RESUME

Le développement croissant des cultures intensives d'algues unicellulaires marines pour l'aquaculture pose aujourd'hui le problème non seulement de la valeur nutritive de ces organismes mais également des ouvertures possibles vers un marché plus spécialisé en pharmacologie et cosmétologie.

En effet, tant au niveau des propriétés étonnantes de certains produits d'excrétions (hydrates de carbone, biotoxines, antibiotiques) que des constituants de base (en particulier lipides et aminoacides) ou des complexes pigmentaires, il semble que peu d'applications semi industrielles aient dépassé l'échelle du laboratoire. Nous avons essayé de faire une synthèse des connaissances dans ce domaine tout en étudiant les quelques tentatives d'utilisation des microalgues à des fins commerciales.

INTRODUCTION

Plus de 99 % de la vie végétale au sein des mers est constitué de particules microscopiques flottant dans les 30 premiers mètres de la couche supérieure, où lumière et énergie leur sont accessibles. Le diamètre de la plupart de ces algues unicellulaires n'excède guère deux centièmes de millimètres et elles sont notoirement constituées de deux grands groupes : les Diatomées et les Dinoflagellés.

Les Diatomées, ou bacillariophycées, constituent les 6/10e de la masse planctonique des océans. Leur corps protoplasmique est emprisonné dans une boîte siliceuse : la frustule. Très dépendantes des conditions de température et d'ensoleillement, ainsi que des apports en sels nutritifs, elles peuvent occasionner, au printemps, et surtout en été, un doublement très rapide de leur population, produisant des efflorescences reconnaissables parfois à la coloration brune, jaune, ou verte de la surface de la mer.

.../..

Les Dinoflagellés constituent un groupe plus ambigu : intermédiaires entre les protophytes et les protozoaires, leur comportement varie de l'hétérotrophie à l'autotrophie stricte en passant par des étapes mixotrophes aléatoires.

Nus ou inclus dans un squelette cellulosique, leur multiplication est généralement plus lente que celle des Diatomées et la compétition serait en leur défaveur s'ils n'étaient favorisés par leur mobilité (due à deux flagelles typiquement orthogonaux) et par leurs besoins plus restreints en sels nutritifs. A certaines époques de l'année leur concentration à la surface de la mer a engendré le fameux phénomène connu sous le nom d'eau rouge.

Il convient de ne pas oublier des groupes mineurs tels que les cyanophycées, les prasinophycées et le vaste ensemble des phytoflagellés nus, siliceux ou calcaires dont les biomasses peuvent être occasionnellement importantes en zones côtières ou estuariennes.

UTILISATION DIRECTE DU PHYTOPLANCTON EN ALIMENTAIRE

En fait, de nombreux exemples d'utilisation alimentaire du plancton marin sont connus depuis longtemps. Il s'agit plutôt du zooplancton, et en particulier des microcrustacés, riches en éléments nutritifs.

L'intérêt de l'exploitation du plancton peut paraître évident, lorsque l'on compare la production phytoplanctonique en mer : $150\ 000\ 10^6$ tonnes par an, à celle du zooplancton : $15\ 000\ 10^6$ t/an, alors que la pêche mondiale de poisson voisine les 60 millions de tonne/an. Le rendement par rapport aux productions primaires et secondaires n'est que de 0,04 %.

Un handicap majeur, excepté pour le "krill", reste l'investissement pêche pour le zooplancton. En revanche, les cultures phytoplanctoniques, faciles à réaliser, sont plus indiquées pour des rendements intéressants.

D'autre part, la biochimie de ces microalgues montre leur valeur nutritive élevée, supérieure à celle de l'albumine de l'oeuf ou du lait écrémé, bien que l'assimilation de leurs protéines ne soit pas totale.

Les cultures à grande échelle de phytoplancton ont surtout concerné les algues d'eau douce : Chlorella et Scenedesmus. Selon, de LA VILLE FROMOIT, au Japon, les chlorelles sont cultivées à l'air libre avec apports de gaz carbonique et sels minéraux en milieu continuellement agité, et permettent des rendements allant jusqu'à 175 kg de protéine par are/an. Les chlorelles sont aussi cultivées à Taiwan par une trentaine d'entreprises avec une production supérieure à 700 t et un prix de vente de 18 dollars US le kilo sec. Spirulina platensis est également énormément utilisée par les Japonais pour colorer les koi et autres poissons d'ornement. Elle contient 1 700 mg/kg de β carotène et 1 600 mg/kg de xanthophylle. On peut également s'en servir pour améliorer la couleur des truites, des saumons ainsi que des crevettes.

La spiruline connaît une distribution très large au niveau utilisation industrielle : au Mexique la Société Sosa - Tex - Coco produit 2 à 5 tonnes sèches /jour de Spirulina (monoculture naturelle dans un lac très alcalin défavorisant les compétiteurs), tandis qu'en France l'IFP même des expériences

en Martinique, en Egypte et au Japon. Bien que cette espèce rivalise avec le soja au niveau teneur en protéines, c'est surtout l'extraction des pigments alimentaires comme la zeaxanthine (jaune) et la myxoxanthophyle (bleu) qui a été expérimentée.

Toujours au Mexique, les taux de croissance des Tilapia rendalli et des Cyprinus carpis specularis ont été augmentés de 62.5 à 100 % pour une alimentation composée exclusivement de Spirulina.

La spiruline remplace peu à peu la chlorelle du fait de sa teneur plus élevée en protéines ; elle est plus facile à digérer, très pigmentée, savoureuse et moins coûteuse à cultiver ou à préparer.

Aux Etats-Unis, sa culture intensive permet des rendements par are de 10 à 50 fois supérieures à ceux du soja et 75 % de ses protéines sont utilisables.

A côté de la spiruline, citons néanmoins le Nostoc consommé dans les potages chinois et l'utilisation de chlorelles comme colorants dans les glaces à la vanille (la norme admise est de 12 g de poudre de chlorelle par glace).

En Israël, la Société Technion utilise des systèmes d'épuration des eaux usées basés sur l'utilisation d'une algue : Microactinium. De tels systèmes produisent, outre une eau propre, une substance nutritive composée de Microactinium et de bactéries. Le rendement est de 35 g/m³/jour pour un produit contenant 40 à 50 % de protéines.

UTILISATION EN AQUACULTURE ET AUTRES DOMAINES

Les volumes cultivés vont des petits récipients de laboratoire (2 à 10 litres) aux installations semi industrielles comprenant généralement des incubateurs de 200 litres (fig. 1, 2, 3 et 4). Les Flagellés restent les plus utilisés, leur assimilation étant plus grande que celle des Diatomées, en particulier pour le prégrossissage de naissain. Le développement récent de la palourde, mais également les cultures mytilicoles et ostréicoles traditionnelles sont demandeuses de cultures d'algues. Les moins sophistiqués utilisent de grands sacs plastiques de 60 à 120 litres alors que les bacs avec récolte semi continu de 200 l utilisés à l'écloserie de CONWY (GB) comprennent un système d'éclairage interne.

Les espèces les plus utilisées sont Tetraselmis, parfois Dunaliella, surtout Isochrysis et Monochrysis (Pavlova) pour les jeunes stades.

La Diatomée Skeletonema costatum est intéressante en hiver du fait de sa tolérance aux températures basses. Les stations produisant des algues en quantité semi-industrielle en France restent cependant peu nombreuses : la SATMAR à Barfleur, Pen Inès Aquaculture dans le Morbihan, l'écloserie d'Houat, la station IFREMER de Bouin et quelques autres. D'une façon générale peu d'espèces de Diatomées (Chaetoceros, Thalassiosira) sont expérimentées, certaines étant carrément prohibées telle Phaeodactylum tricor-nutum, d'une faible valeur nutritive mais d'un haut pouvoir contaminant pour les autres espèces.

Les besoins en aquaculture restent cependant modestes puisqu'ils concernent surtout les jeunes stades de mollusques. Certains producteurs ont essayé de diversifier l'utilisation de ces algues en offrant leurs services aux firmes cosmétologiques. Là encore Tetraselmis semble la panacée puisqu'elle est utilisée dans des crèmes, lotions et shampooings par quelques fabricants très connus sous le nom d'aquaplancton. La consommation peut quand même atteindre plusieurs tonnes de culture par an. L'utilisation se fait généralement sous forme congelée, ou de pâte concentrée après fixation des cellules au formol et filtration. Les coûts à la vente de tels concentrés phytoplanctoniques restent élevés du fait des normes de contrôle obligatoire telles que tests anti-poison et tests d'irritation cutanée. On peut néanmoins s'interroger sur les propriétés thérapeutiques de ces concentrés algaux.

Citons enfin l'existence d'incubateurs sophistiqués (fig. 5) tels que ceux utilisés à des fins scientifiques pour étudier les biotoxines de certaines espèces à croissance lente (genre Gonyaulax et Prorocentrum par exemple).

COMPOSITION ET PROSPECTIVE

Malgré la valeur nutritive reconnue des microalgues, au moins en aquaculture, peu de cultures en masse sont réalisées en tenant compte de la composition élémentaire de l'espèce choisie. Les critères de choix sont généralement toujours les mêmes : taux de division élevé et développement rapide sur les milieux nutritifs les plus simples. Nous avons donc essayé de rassembler quelques données sur le sujet.

LES CONSTITUANTS DE BASE

Selon LIMA ZANGHI, les acides gras insaturés en C₂₀ et C₂₂ sont dominants chez les algues vertes unicellulaires. Les A.G. saturés et²² insaturés en C₁₆, C₁₂ et C₂₀ se trouvent chez les Chlorophycées et les Diatomées, ces dernières²⁰ étant surtout riches en acides palmitiques et stéariques. Des analyses sur deux espèces : Nitzschia closterium et Chaetoceros simplex ont montré une dominance d'A.G. en C₁₄ et C₁₆.

Une étude plus complète sur les différents groupes marins a été réalisée par POHL et ZURHEIDE (tableau I).

En ce qui concerne les acides aminés, des travaux réalisés par OKAICHI ont montré la présence chez Cyclotella, Skeletonema et Prorocentrum de 18 AA différents. Ces substances se retrouvent chez des prédateurs expérimentaux (deux copépodes et deux poissons) mais avec des "rendements" différents. L'auteur conclut à une bonne assimilation dans les bas niveaux de consommation, et à une mauvaise pour les hauts niveaux (fig. 6 et fig. 7).

De très nombreux travaux ont été réalisés sur les pigments chlorophylliens ou autres (caroténoïdes, fucoxanthines, etc...), en particulier par GOODWIN (tableau II). Des cas particuliers comme le verdissement des huîtres après consommation de Navicula ostreara espèce productrice de Marennine (ROBERT, 1984) peuvent avoir des prolongements sur un plan commercial. La production de Marennine serait liée au vieillissement des cellules ou induite par toute carence alimentaire.

MGDG = Monogalactosyl diglyceride
DGDG = Digalactosyl diglyceride

SL = Sulpholipide
PG = Phosphatidyl glycerol
PC = Phosphatidyl choline

Groupes / Espèces	Acides gras	Lipides
Chrysophycées Monochrysis lutheri Syracosphaera carterae Pseudopedinella sp. Prymnesium parvum Isochrysis galbana Dicrateria inornata Coccolithus huxleyi Cricosphaera carterae C. elongata	Insaturés en C ₁₆ , C ₁₈ , C ₂₀ et C ₂₂ en concen- trations variables selon les espèces	pas de données
Xanthophycées Olisthodiscus sp flagellé non ident.	Peu de données acide gras en C ₁₆ et C ₂₀	
Bacillariophycées Nitzschia closterium N. angularis Cyclotella cryptica Phaeodactylum tricornutum Skeletonema costatum Ditylum brightwellii Bidulphia sinensis Chaetoceros septentrionale Lauderia borealis Asterionella japonica Thalassiosira fluviatilis Navicula incerta	Les principaux acides gras sont en C ₁₆ et C ₂₀ avec une faible teneur en C ₁₈ caractéristique de cette classe	Triglycerides surtout et MGDG, SL, PG, PC, DGDG Les galactolipides contiennent une grande quantité d'acides gras en C ₁₆ et C ₂₀
Dinophycées Amphidinium carterii Exuviaella sp Glenodinium sp Gonyaulax catenella G. polyedra G. tamarensis Gymnodinium nelsoni Peridinium triquetrum P. trochoideum Prorocentrum micans	La plus grande proportion d'acide gras chez la plupart des Dinophycées consiste en un C ₁₆ saturé et trois insaturés en C ₁₈ , C ₂₀ et C ₂₂ . Découverte récente en culture et "in situ" d'un acide octadeca- pentaenoïque	Peu d'information Glenodinium sp → MGDG, DGDG, PC et trigycérides
Chlorophycées et Prasinophycées Dunaliella primolecta D. tertiolecta D. salina Chlamydomonas sp Heteromastix rotunda Tetraselmis sp Platymonas tetrathele Halosphaera viridis	Fortes proportions d'AG en C ₁₆ et C ₁₈ insaturés Aucun acide gras ne prédomine cependant chez urequelconque espèce	
Cryptophycées Hemiselmis rufescens H. brunescens H. virescens Cryptomonas appendiculata C. maculata C. sp.	Espèces marines riches en AG saturés et insaturés en C ₁₆ , C ₁₈ , C ₂₀ et C ₂₂	chez Cryptomonas sp → MGDG, DGDG, SL, PG et PC

Tableau I : Acides gras et lipides chez quelques algues unicellulaires marines
(d'après POHL et ZURHEIDE, 1979).

Groupes / Espèces	Sterols	Caroténoïdes	
Bacillariophycées	Fucosterol, brassicasterol brassicasterol methylsterol (24 α methylsterol)	"	
Nitzschia closterium		β carotène, diatoxanthine, diadinoxanthine et fucoxanthine	
Cyclotella nana			
Phaeodactylum tricornutum		"	
Melosira sp		α carotène α carotène	
Fragilaria sublinearis			
Navicula spp.			
Thalassiosira gravida			
Chlorophycées	Dunaliella primolecta D. salina D. tertiolecta	α carotène α carotène	
Xanthophycées		diadinoxanthine diatoxanthine heteroxanthine	
Haptophycées		Emiliana huxleyi Isochrysis galbana Pavlova lutheri	19'-n-hexanoyloxy fucoxanthine id Prymnesium et echinenone id Prymnesium et canthaxanthine dinoxanthine fucoxanthine fucoxanthine, β cryptoxanthine, diadinoxanthine, et β carotène diatoxanthine fucoxanthine
Phaeocystis pouchetii Prymnesium parvum	Syracosphaera carterae		
	Dinophycées		
Gonyaulax tamarensis	Dinosterol	dinoxanthine, peridinine, β carotène, diadinoxanthine	
G. polyedra		"	
Prorocentrum micans		"	
Amphidinium spp		"	
Gymnodinium spp		id et diatoxanthine, pyroxanthin et peridinol	
Glenodinium dorsum et sp			
Peridinium spp		id et fucoxanthine, γ carotène "	
Protoceratium reticulatum			

Tableau II : Analyses des sterols et caroténoïdes chez plusieurs algues unicellulaires marines (d'après GOODWIN, 1979).

Des complexes proteiques très colorées comme le péricidine chlorophylle chez Prorocentrum micans et Glenodinium sp. seraient responsables dans certains cas de la coloration rouge vif du liquide intra valvaire des huîtres.

Enfin la composition en éléments métalliques de 15 espèces de phytoplanctonites a été étudiée par RILEY. Il a retrouvé la présence de tous les éléments métalliques importants (Mn, Zn, Cu, Ag, Pb, Sn, Ni, Be, V, Al, Ti, Bi, Ba, Cr, Sr) sans qu'une différence dans la distribution de ces éléments puisse être expliquée par des différences d'ordre taxonomiques (fig. 8).

ANTIBIOTIQUES ET TELEMEDEIATEURS CHIMIQUES

Les travaux du CERBOM, et en particulier l'équipe du Dr AUBERT, ont fait date grâce à la théorie du pouvoir autoépurateur de l'eau de mer dû aux antibiotiques produits par de nombreuses espèces phytoplanctoniques.

Quoique controversées, ces observations avaient déjà été abordées dès 1944 par PRATT qui trouvait dans les cultures de Chlorella vulgaris et C. pyrenoidosa une activité antistaphylocoque.

Plus tard SIEBURTH trouve une activité antibactérienne chez Skeletonema costatum en période de bloom vis à vis d'Escherischia coli. Le même auteur démontre l'action de l'acide acrylique comme facteur antibactérien produit par une haptophycée : Phaeocystis pouchetii. Cependant un facteur de concentration par la chaîne alimentaire semble indispensable (comme c'était le cas pour les pingouins de SIEBURTH). Des données plus récentes (GROSSEL) montrent que l'analyse de l'acide acrylique in situ lors d'un bloom de Phaeocystis en Mer du Nord ne permet pas d'atteindre les concentrations actives (plus de 13 µg/l).

Les travaux d'AUBERT et col. ont montré chez Asterionella japonica la présence d'une substance antibactérienne constituée d'un nucléotide (stable) et d'un acide gras polyinsaturé en C₂₀ avec 5 doubles liaisons de type malonique.

De nombreuses espèces phytoplanctoniques en culture se sont d'ailleurs montrées actives contre de nombreux germes (Staphylococcus aureus 209 P, Shigella dysenterias, Bacillus subtilis, Clostridium, etc...)

En 1972 l'équipe du Dr BERLAND a également mis en évidence une action antibactérienne chez la Chrysophycée Stichochrysis immobilis, et la substance responsable serait constituée d'un peptide de 30 AA (PM : 3 400, et d'un "Gelbstoff" (acide humique) de PM : 2 600).

La nature des substances antibiotiques pouvant intervenir en milieu marin semble assez large selon PAOLETTI : Acide acrylique, terpènes, Chlorophylle, Phaeophytine, Acide gras, Macroprotéines, composés hydrocarbonés, et antibiotique de type pyrrolique. L'acide acrylique serait considéré comme une substance à "vie courte" alors que les pigments chlorophylliens et les tanins seraient persistants.

Notons enfin qu'en 1961 BURKHOLDER montre que des Dinoflagellés du genre Gonyaulax peuvent produire des antibiotiques analogues à ceux trouvés dans les tissus coralliens (composés terpenoïdes et hydrocarbonés).

Une activité antifongique a également été caractérisée chez de nombreuses espèces algales (PESANDO et GNASSIA-BARELLI) mais surtout chez Asterionella notata (tableau III).

Bien que peu ou pas de données biochimiques existent en ce domaine il ne faut pas négliger enfin la production de substances extracellulaires par presque toutes les microalgues marines et responsables d'inhibition ou d'amélioration de croissance d'autres espèces. Des travaux dus à PINCEMIN, PESANDO, et surtout IWASAKI font état de différents types d'actions stimulantes ou inhibitrices résumables en trois cas : relations mutuellement avantageuse, relations mutuellement exclusives et absence d'effets interspécifiques (fig. 10). Dans la plupart des cas le filtrat d'une culture est testé sur une autre culture. Ainsi Cochlodinium inhibe le développement de Chaetoceros, alors qu'Asterionella japonica est inhibiteur (fig. 11).

Les substances en jeu pourraient être des tanins comme dans le cas des effets inhibiteurs ou favorisant de la croissance de Skeletonema costatum par une culture d'Olisthodiscus luteus à forte ou faible concentration (fig. 12).

BIOTOXINES

Un nombre grandissant de biotoxines dangereuses soit directement pour l'homme (lorsqu'il consomme des coquillages contaminés) soit pour les animaux marins, est secrété par des microalgues marines appartenant le plus souvent au groupe des dinoflagellés (fig. 13). Certaines de ces toxines sont utilisées en pharmacologie pour leur propriété, c'est le cas par exemple de la saxitoxine dont des solutions dosées peuvent être communiquées à la demande par la Food and Drug Administration. Les autres toxines sont actuellement difficile à concentrer en quantité importante tant que la culture des espèces qui les produisent n'est pas maîtrisée.

Parmi les plus connues citons la Ciguatoxine de nature lipidique responsable avec la Maitotoxine de la Ciguatera (fig. 14). Elle est transmise à l'homme par de nombreuses espèces de poissons des récifs coralliens, contaminés eux même par un dinoflagellé : Gambierdiscus toxicus. La CTX, comme la STX augmente perméabilité membranaire aux ions Sodium et provoque la libération de Catecholamines au niveau des terminaisons des nerfs sympathiques, tandis que la MTX augmente le flux de Calcium à travers les membranes. Les symptômes correspondants chez l'homme sont des vomissements, diarrhées, nausées, paresthésie et Myalgie accompagnés d'une bradycardie et hypotension.

Tout aussi connue, la Mytilotoxine, ou Saxitoxine, ou poison paralytique des coquillages, est produite par plusieurs espèces de dinoflagellés appartenant au genre Gonyaulax (fig. 15). Les symptômes sont plus graves : paralysie respiratoire et décès par collapsus cardiovasculaire. En fait plusieurs toxines sont associées à la Saxitoxine dont au moins 8 Gonyautoxines.

TABLEAU III : ACTIVITES ANTIFONGIQUES DE QUELQUES ESPECES UNICELLULAIRES MARINES (d'après PESANDO, 1979).

	<i>Candida albicans</i> (yeast)	<i>Sporothrix schenckii</i> (mould)	Trichophyton mentagrophytes (Dermatophyte)	Microsporium gypseum(Dermatophyte)	Epidermophyton floccosum (Dermatophyte)	<i>Aspergillus fumigatus</i> (mould)
BACILLARIOPHYCEAE						
<i>Asterionella japonica</i> Cleve	+++	+++	+++	++	-	+++
<i>Asterionella notata</i> Grunow	-	-	-	-	-	-
<i>Chaetoceros affinis</i> Lauder	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Chaetoceros brevis</i> Schütt	+++	+++	+++	+++	A	+++
<i>Chaetoceros danicus</i> Cleve	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Chaetoceros protuberans</i> (var. Nivali ?)	+++	+++	+++	+++	++	+++
<i>Chaetoceros lauderi</i> Ralfs	+++	-	-	-	-	+
<i>Chaetoceros lorenzianus</i> Grunow	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Chaetoceros pseudo curvisetus</i> Mangin	+++	++	+	-	-	+++
<i>Chaetoceros socialis</i> Lauder	+++	++	+	-	-	+++
<i>Chaetoceros</i> sp.	+++	+++	+++	+++	++	+++
<i>Fragilaria pinnata</i> Ehrenberg	+	+	-	-	-	+++
<i>Gyrosigma fasciola</i> (Ehrenberg) Cleve	+++	+++	++	+++	-	+++
<i>Lithodesmium undulatum</i> Ehrenberg	+++	+++	+++	+++	++	+++

<i>Navicula incerta</i> Grunow	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Nitzschia ascicularis</i> W. Sm.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Nitzschia seriata</i> Cleve	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Phaeodyctylum tricornutum</i> Bohlin	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Skeletonema costatum</i> (Greville) Cleve	+++	+++	+++	+++	-	+++
<i>Thalassiosira</i> sp.	+++	+++	++	++	-	+++

DINOPHYCEAE						
<i>Amphidinium</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Coolia monotis</i> Meunier	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Exuviella mariae labouriae</i> Parke and Ballantine	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Exuviella</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Glenodinium</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Gonyaulax</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Peridinium Trochoideum</i> (Stein) Lemmerman	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Prorocentrum micans</i> Ehrenberg	+++	+++	+++	+++	+++	+++

HAPTOPHYCEAE						
<i>Coccolithus huxleyi</i> (Lohmann) Kamptner	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Coccolithosphaera</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Cricosphaera elongata</i> Parke and Green	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Dicrateria</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Isochrysis galbana</i> Parke	+++	+++	+++	+++	+++	+++

	<i>Candida albicans</i> (yeast)	<i>Sporothrix schenckii</i> (mould)	Trichophyton mentagrophytes (Dermatophyte)	Microsporium gypseum(Dermatophyte)	Epidermophyton floccosum (Dermatophyte)	<i>Aspergillus fumigatus</i> (mould)
OCHROSPHAERACEAE						
<i>Ochrosphaera neapolitana</i> Schussnig	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Monochrysis lutheri</i> Droop	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Pavlova pinguis</i> Green	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Prymnesium parvum</i> Carter						
CHLOROPHYCEAE						
<i>Dunaliella</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Dunaliella primolecta</i> Butcher	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Dunaliella salina</i> (Dunal) Theod.	+++	+++	+++	+++	+++	+++
CRYPTOPHYCEAE						
<i>Chroomonas fragarioides</i> Butcher	+++	+++	+++	+++	+++	+++
PRASYNOPHYCEAE						
<i>Platymonas succica</i> Kylin	+++	+++	+++	+++	+++	+++
<i>Platimonas</i> sp.	+++	+++	A	+++	A	+++
<i>Tetraselmis maculata</i> Butcher	+++	+++	+++	+++	+++	+++

RHODOPHYCEAE						
<i>Porphyridium</i> sp. Naëgeli	+++	+++	+++	+++	A	+++
XANTOPHYCEAE						
<i>Heterothrix</i> sp. Pashner	+++	+++	+++	+++	+++	+++
CYANOPHYCEAE						
<i>Cyanophyceae</i> sp.	+++	+++	+++	+++	+	+++
<i>Microcystis</i> sp. Kützing	+++	+++	+++	+++	+++	+++

+++ normal growth
 ++ delayed growth
 + weakly growth
 - no growth after 15 days incubation
 A - not tested

Ce poison agit par blocage du transfert membranaire du Sodium au niveau des canaux Sodium. L'action est prépondérante au niveau du SN périphérique des muscles.

Plus récemment un toxique diarréique, la DTX a été isolé par YASUMOTO à partir de coquillages contaminés par un dinoflagellé du genre Dinophysis. Le même type d'intoxication a été signalé sur les côtes françaises en 1983 et 1984, associée à la prolifération d'une autre espèce de Dinophysis apparemment plus riche en Acide Okadaïque, précurseur des DTX₁ et DTX₃. Le flux de calcium membranaire est perturbé par cette toxine et les symptômes humains consistent en diarrhées, céphalées et vomissements pendant 48 h.

D'autres toxines ont fait également l'objet de travaux un peu partout dans le monde. Citons la Brevetoxine B produite par le Dinoflagellé Ptychodiscus brevis et responsables d'effets irritants et neurotoxiques (NSP) chez l'homme. C'est aussi une substance Ichthyotoxique mortelle pour les poissons.

De même pour une Haptophycée, Prymnesium parvum dont la toxine, un glycolipide complexe appelé Prymnesine est mortelle pour les poissons et montre une activité hemolytique et cytotoxique. Dans le cas des flagellés du genre Chattonella, bien connus au Japon pour les hécatombes estivales de poissons d'élevage qu'ils provoquent, l'action a lieu au niveau des branchies dont les tissus épithéliaux sont détruits par les polysaccharides élaborés dans le mucus extracellulaire de ces algues.

Enfin un doute subsiste encore sur la réalité de la production de VSP (Venerupine Shellfish Poison) par le dinoflagellé Prorocentrum minimum (Var. Mariae Lebouriae). Les effets de cette toxine auraient provoqué la mort de plusieurs personnes près du Lac Hamana (Japon) après destruction des tissus hépatiques (symptômes ; anorexie, douleur abdominale, nausées, vomissement, maux de tête, hémorragies cutanées, atrophie aigue, hépatite).

CONCLUSIONS

Il paraît difficile de faire un bilan des nombreux travaux épars concernant les produits élaborés par les algues unicellulaires marines. S'il est certain que leur valeur nutritive en fait un maillon potentiellement producteur dans l'avenir les techniques de culture en masse ne dépassent guère aujourd'hui quelques objectifs restreints comme le prégrossissage de naissain. Des débouchés vers la cosmétologie sont envisageables, pour autant que les propriétés de ces algues soient reconnues.

Un large domaine reste à explorer sans doute : celui des constituants pigmentaires dont l'utilisation en alimentaire pourrait être plus recherchées.

En ce qui concerne les substances antibactériennes mises en évidence par de nombreux auteurs, il reste que leur nature chimique est encore mal connue et surtout que les concentrations actives dans l'environnement ou obtenues en culture ne laissent pas entrevoir une utilisation pharmaceutique prochaine.

Restent les biotoxines qui semblent un secteur riche en information et développements futurs. Certaines substances extraites de dinoflagellés à l'Université de Tohoku (Japon) semblent avoir des propriétés insecticides en agissant spécifiquement sur le SN périphérique des insectes, tandis que les toxines que l'on pourrait synthétiser à partir de cultures en masse de dinoflagellés concentrées par des bivalves seraient certainement d'une aide précieuse dans le domaine médical.

Un recensement des connaissances opéré récemment en biochimie marine permet d'ailleurs de résumer ce qui concerne les microalgues (tableau IV).

Espèces	Groupes	Substances mises en évidence	Activité pharmacologiques repérées
Nostoc	Gamophycie	Anthraquinone	antalgique
Oscillatoria	Cyanophycée	Fraction hydro et ethero-solubles	bactericide
Trichodesmium	Cyanophycée	-	Bacteriostatique
Amphidinium	Dinophycée	Fraction ethersoluble	Bacteriostatique
Gonyaulax	Dinophycée	Saxitoxine	Neurotrope, anesthésique
Dinophysis	Dinophycée	Acide okadaïque	
Gymnodinium	"	Fraction ethersoluble	Neurotrope
Gambierdiscus	"	Ciguatoxine	
Peridinium	"	Glenodinine	Neurotrope
Zooxanthelles	Algues parasites	Crassine acetate	Amoebicide
Asterionella	Bacillario-phycée	Nucleotide	Bacteriostatique
Chaetoceros	Bacillario-phycée	-	Bacteriostatique
Cyclotella	"	Fct ethersoluble	Bacteriostatique
Fragillaria	"	-	Toxique
Skeletonema	"	Fct hydro et ethersolubles	Bacteriostatique
Thalassiothrix	"	-	Bacteriostatique
Ochromonas	Phytoflagellé	Fct hydrosoluble	Toxique
Coccolithus	Phytoflagellé	Fct organosoluble	Toxique
Isochrysis	Phytoflagellé	Organosoluble	Bacteriostatique
Monochrysis	Phytoflagellé	Organosoluble	Bacteriostatique
Phaeocystis	Haptophycée	Acide acrylique	Bacteriostatique
Prymnesium	Chrysophycée	Fct hydro et organo solubles	Toxique, hemolytique et antispasmodique

Tableau IV : Substances à activités pharmacologiques déterminées chez quelques algues unicellulaires marines et dulçaquicoles.

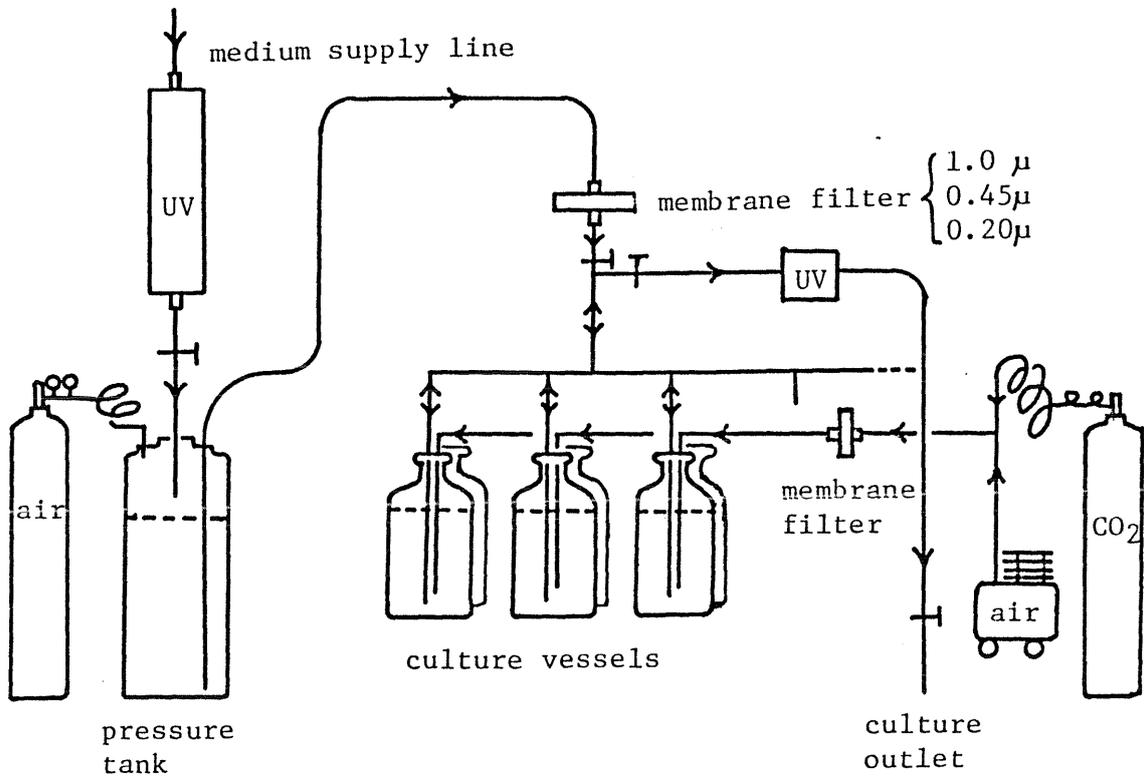


Fig.1 Phytoflagellates culture system using 10 l bottles.

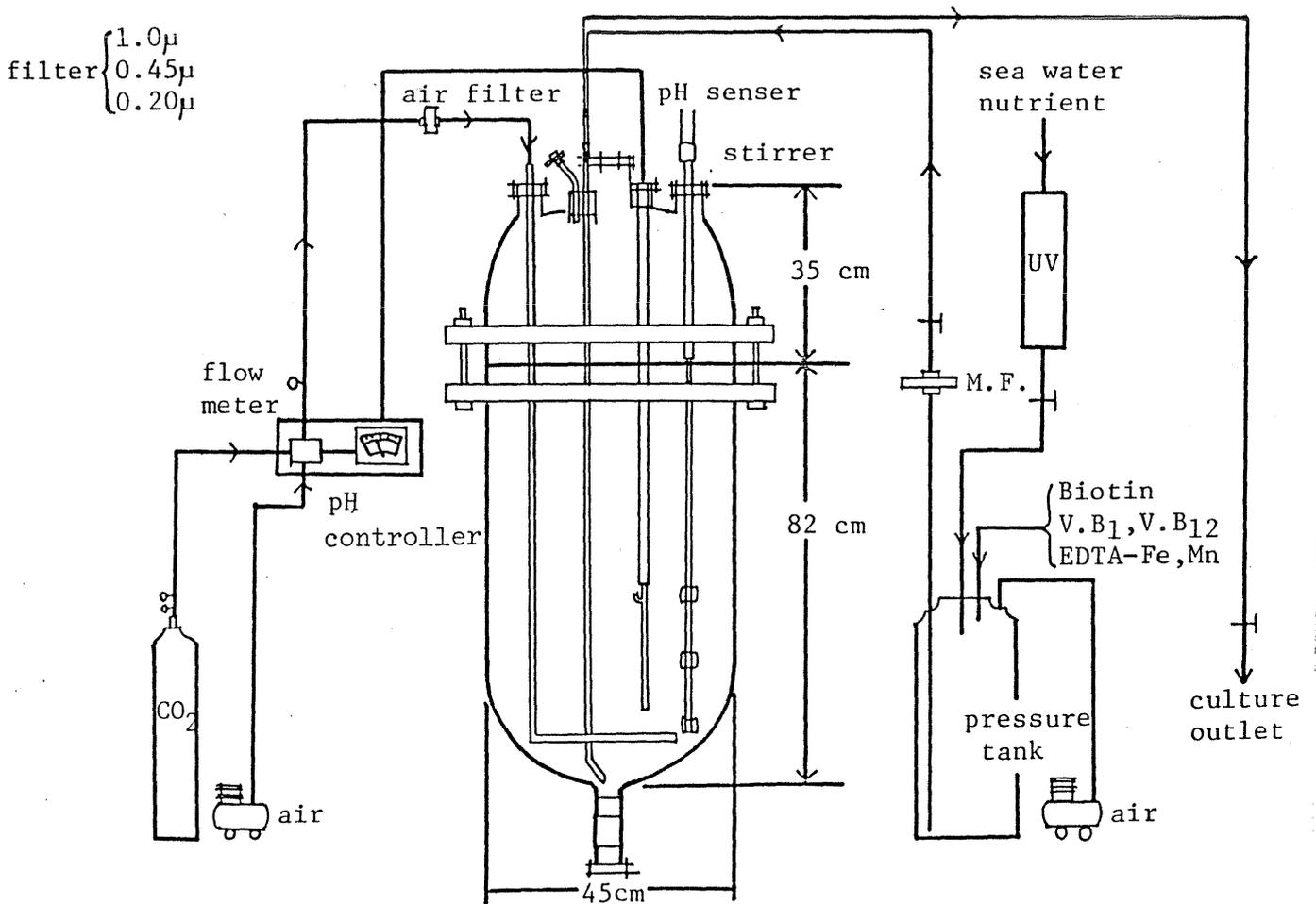


Fig.2 Intermittent harvesting culture system using 100 l tank

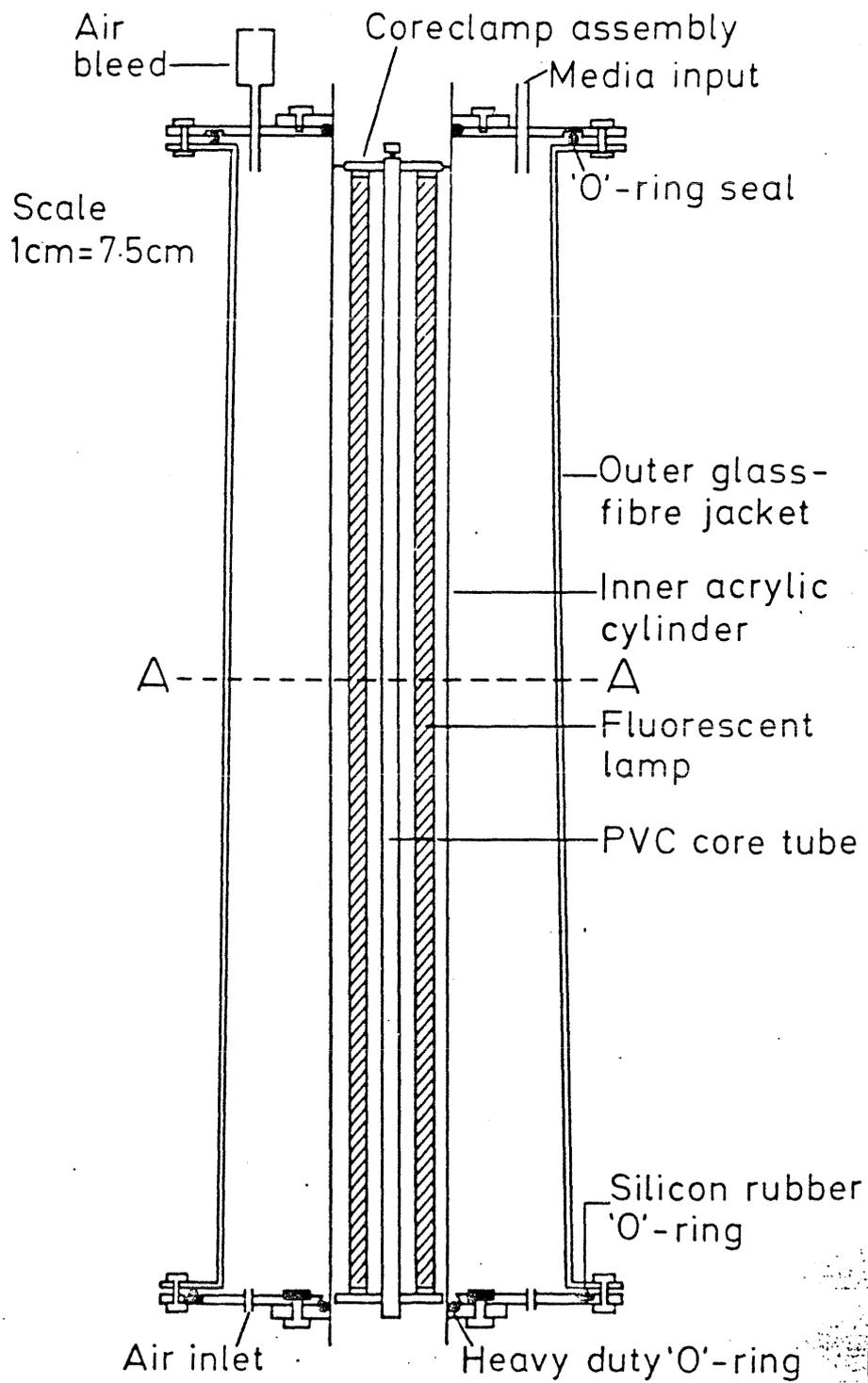


Fig. 3 Citerne de 200 l pour culture semi-industrielle de Tetraselmis

Table 2 Data on the culture of *Tetraselmis* in 200 l vessels

Parameter	Culture trial					
	1	2	3	4	5	6
Cell density at inoculation (no./ μ l)	99	79	86	78	68	135
Age of inoculum (d)	28	73	7	49	67	140
Time to first harvest (d)	5	6	5	6	6	5
Cell density at first harvest (no./ μ l)	1,450	1,630	1,680	2,730	1,800	1,560
Total volume of culture harvested (l)	1,250	2,740	3,970	2,010	1,920	930
Average volume of culture harvested (l)	78.1	80.6	72.2	74.4	87.3	62.0
Volume harvested at a density of 1000 cells μ l ⁻¹ (l/d)	48.6	49.7	58.1	51.6	52.0	50.6
Volume harvested at a density of 1000 cells μ l ⁻¹ kW ⁻¹ (l/d)	151.9	155.3	181.6	161.2	162.5	158.1
Longevity of culture (d)	43	76	104	60	70	29

Fig 4 Production cellulaire en cultures de 200 l chez Tetraselmis

Table 1. Intermittent harvesting culture of *Protogonyaulax catenella* using 10 l bottles.

Culture No.	Days	Medium Vol. (l)	Cell Density cells ml ⁻¹	Yield		Total MU	Dark hours before harvest
				(wet g)	(dry g)		
1	14	100	47,000	103.2	11.2	35,000	-
2	10	100	67,000	67.0	7.1	82,000	46
3	8	100	65,000	86.0	9.1	128,000	48
4	7	100	32,000	49.2	5.8	84,000	48

2. Intermittent harvesting culture of *Prorocentrum minimum* using 10 l bottles

Culture No.	Days	Medium Vol. (l)	Yield dry g
1	10	70	5.1
2	6	50	3.9
3	3	50	3.4
4	4	70	5.0
5	4	30	2.5
6	4	30	2.1
7	6	30	2.0
8	5	40	3.4
9	12	120	12.5
Total		490	39.9
yield per 100 l			8.1

Table 3. Intermittent harvesting culture of *Chattonella antiqua* using 100 l tank

Culture No.	Days	Medium Vol. (l)	Cell number ml ⁻¹
1	7	60	21,600
2	6	60	17,000
3	8	60	16,700
4	5	60	24,700
5	5	60	36,000
6	5	60	40,000
7	4	80	29,000
Total		440	1.2x10 ¹⁰
yield per 100 l			2.7x10 ⁹

Fig 5 Productions cellulaires en 10 l et 100 l de cultures de dinoflagellés toxiques

DISTRIBUTION OF TRACE ELEMENTS IN PHYTOPLANKTON

(p.p.m. in dry plankton.)

Class ...	Chlorophyceae					
	Order ...	Volvocales			Chlorococcales	Ulotrichales
		Sub-order ...	Dunaliellaceae	Chlamydomonadaceae	Oocystaceae	Ulotrichaceae
			Genus ...	<i>Dunaliella</i>	<i>Chlamydomonas</i>	<i>Chlorella</i>
Species ...	<i>primolecta</i>	<i>tertiolecta</i>	sp.	<i>salina</i>	<i>bacillaris</i>	
Plymouth no ...	81	83	430	309	82	
% ash of dry material (p.p.m.)	3.5	3.2	3.4	9.5	4.8	
Mn	11.5	3.8	6.8	48	4.6	
Zn	405	285	116	301	251	
Cu	52	57	46	25	53	
Ag	9.0	7.8	8.8	4.6	3.8	
Pb	16.5	8.1	11	< 10	20.3	
Sn	34	17.5	29.5	< 9	34.5	
Ni	6.4	4.3	7.1	3.1	2.9	
Be	2.0	1.1	1.5	2.7	1.9	
V	2.4	2.9	1.2	3.7	2.4	
Al	289	160	307	118	255	
Ti	10.8	15.1	26.2	13.5	20.4	
Bi	6.4	2.9	7.7	—	3.5	
Ba	80	37.5	76	70.5	48.5	
Cr	8.4	3.6	4.4	< 3	2.8	
Sr	< 1.5	5.8	8.6	31.4	6.1	

Amino acid compositions of phytoplanktons, zooplanktons and sand eel (Values are expressed as g amino acid /100 g total amino acids)

Amino acid	<i>Cyclotella</i> sp.	<i>Skeletonema costatum</i>	<i>Prorocentrum triestinum</i>	<i>Microsetella norvegica</i>	<i>Paracalanus parvus</i>	Sand eel
Aspartic acid	12.5	13.1	11.0	8.7	10.0	8.9
Serine	5.3	6.6	5.1	3.8	4.5	4.3
Threonine	5.5	9.2	3.5	4.5	4.4	5.1
Glutamic acid	10.7	6.5	4.7	12.0	12.6	14.4
Proline	5.1	4.7	4.9	2.7	2.7	3.5
Glycine	6.2	6.2	7.1	8.8	7.5	5.4
Alanine	7.1	7.9	8.2	8.5	7.3	6.2
Cystine	0.0	0.0	0.9	1.4	0.0	0.0
Valine	5.2	6.7	6.1	6.0	5.4	5.6
Methionine	1.7	2.0	2.6	1.7	2.5	3.5
Isoleucine	5.5	5.6	4.2	4.3	5.7	5.1
Leucine	9.4	8.1	8.7	7.2	6.9	8.2
Tyrosine	4.4	2.9	3.6	7.9	4.7	3.6
Phenylalanine	5.3	5.3	5.0	2.9	3.7	4.8
Lysine	4.8	6.0	9.5	6.1	7.6	9.3
Histidine	1.5	1.3	3.0	2.0	2.2	2.9
Arginine	5.2	4.8	9.3	7.1	6.6	6.0
Tryptophan	1.9	1.5	1.4	2.2	2.4	1.5

Fig 6 Composition en métaux lourds et en A.A. de plusieurs espèces algales unicellulaires

Essential amino acid indexes of cultured phytoplanktons to the consumers of various trophic levels and chicken egg*¹

Consumer	<i>Cyclotella</i> sp.	<i>Skeletonema</i> <i>costatum</i>	<i>Skeletonema</i> * ² <i>costatum</i>	<i>Prorocentrum</i> <i>triestinum</i>	<i>Olithodiscus</i> ⁺ sp.	<i>Prymnesium</i> ⁺ <i>parvum</i>	<i>Phaeodactylum</i> ⁺ <i>triconutum</i>	Mean
<i>Microsetella norvegica</i>	89.4	88.7	81.3	92.4	78.6	92.6	82.7	86.5
<i>Paracalanus parvus</i>	76.7	81.1	75.0	88.7	72.5	89.6	76.0	79.9
Hard clam	87.0	87.0	80.3	92.8	79.2	93.0	77.7	85.3
Sand eel	81.2	82.2	73.0	90.6	75.0	80.6	72.6	79.3
Yellow tail	71.6	76.2	65.7	80.8	64.1	76.9	64.8	71.4
Chicken egg	75.8	78.2	68.5	82.7	68.4	81.7	69.2	74.9

*¹ Calculated from the data of BLOCK and BOLLING¹⁰⁾. *² Calculated from the data of OGINO⁹⁾. + Calculated from the data of CHAU *et al.*¹⁾

Fig 7 Rendement en amino-acides de la consommation de différentes cultures algales par des prédateurs secondaires et tertiaires.

Class ...	Cryptophyceae		Xanthophyceae	Bacillariophyceae		
Order ...	Cryptomonadales		Heterochlori- dales	Bacillariales	Pennales	
Sub- order ...	Cryptomonadaceae		Heterochlori- daceae	Araphidineae	Cymbellaceae	
Genus ...	<i>Hemiselmis</i>		<i>Olisthodiscus</i>	<i>Asterionella</i>	<i>Phaeodactylum</i>	
Species ...	<i>virescens brunescens</i>		<i>luteus</i>	<i>japonica</i>	<i>tricornutum</i>	
Plymouth no. ...	157	14	239	1016	100	Sea plankton
% ash of dry material	7.1	15.2	7.4	24.1	7.9	45.8
Mn	6	33	20	54	73	118
Zn	259	480	75	115	325	282
Cu	93	188	62	105	110	36
Ag	3.7	14.1	13.7	10	6.6	3.3
Pb	32	56.5	< 8	< 20	46.3	900
Sn	28	45.5	< 8	35	101	34
Ni	2.8	3.3	2.7	< 12	6.2	48
Be	2.5	3.2	2.3	< 4	3.8	< 6
V	< 3	< 5	< 2	< 5	< 2	3.1
Al	169	550	358	1750	490	< 5000
Ti	24.3	37.6	10.5	85	16	940
Bi	—	—	—	—	—	—
Ba	67	262	34.5	75	95	248
Cr	4.8	30	14.7	5.5	4.4	7.5
Sr	6.7	39	< 3	< 7	7.6	70

Class ...	Chrysophyceae		Prasinophyceae		
Order ...	Chromulinales		Pyraminonadales		
Sub- order ...	Chromulinaceae	Pedinellaceae	Nephroselmidaceae		Tetraselmidaceae
Genus ...	<i>Monochrysis</i>	<i>Pseudopedinella</i>	<i>Heteromastix</i>	<i>Micromonas</i>	<i>Tetraselmis</i>
Species ...	<i>lutheri</i>	<i>pyriformis</i>	<i>longifillis</i>	<i>squamata</i>	<i>tetrathele</i>
Plymouth no. ...	75	439	58	189	272
% ash of dry material	5.3	7.4	13.9	5.1	7.5
Mn	69	30	14.5	29	62
Zn	160	243	325	105	410
Cu	47	29	210	95	90
Ag	6.2	9.7	10.2	4.5	12.6
Pb	9.2	12	50	21.2	< 8
Sn	49.5	11	96	22.4	< 8
Ni	7.5	4.9	10.3	6.7	5.6
Be	1.9	1.7	8.4	2.7	5.7
V	3.1	< 4	< 5	5.7	< 5
Al	275	478	735	225	425
Ti	7.8	10.7	99.5	48	21
Bi	2.0	—	4.5	—	—
Ba	70	85.5	54.5	145	128
Cr	9.4	8.2	< 5	13.5	8.0
Sr	27	< 5	< 6	9.8	27.5

Fig 8 Composition en métaux lourds de plusieurs espèces marines

Germes testés	Organismes phytoplanctoniques actifs	Germes testés	Organismes phytoplanctoniques actifs
Staphylococcus aureus 209 P	Skeletonema costatum Thalassiosira decipiens Bacteriastrium elegans Chaetoceros socialis Chaetoceros peruvianus Chaetoceros teres Lithodesmium undulatum Licmophora abbreviata Gyrosigma spenceri Thalassiothrix frauenfeldi Asterionella japonica Nitzschia seriata Nitzschia longissima (Var. Closterium) Nitzschia ascicularis Prymnesium parvum	Neisseria flava	Rhizosolenia alata Chaetoceros peruvianus Chaetoceros teres Thalassiothrix frauenfeldi Asterionella japonica Licmophora abbreviata Gyrosigma spenceri Nitzschia seriata Nitzschia longissima (Var. Closterium) Nitzschia ascicularis Bacillaria paradoxa Prymnesium parvum
		Moraxella bovis	Prymnesium parvum
		Bacillus subtilis	Chaetoceros teres Asterionella japonica Prymnesium parvum
Sarcina lutea	Skeletonema costatum Bacteriastrium elegans Chaetoceros peruvianus Chaetoceros teres Lithodesmium undulatum Thalassiothrix frauenfeldi Asterionella japonica Gyrosigma spenceri Licmophora abbreviata Nitzschia seriata Nitzschia longissima (Var. Closterium) Nitzschia ascicularis Prymnesium parvum	Streptococcus faecalis	Asterionella japonica Prymnesium parvum
		Shigella dysenteriae	Chaetoceros teres
		Serratia marcescens	Prymnesium parvum
		Proteus vulgaris Proteus rettgeri	Chaetoceros teres
		Proteus morgani	Chaetoceros teres Prymnesium parvum

· Toxicité des diverses algues de culture.

Culture N°	Espèce Nombre de cellules recueillies	Fraction hydrosoluble US	Fraction liposoluble US
1	<i>Amphidinium</i> sp. (I) 1,2 x 10 ⁶	230	180
2	<i>Amphidinium</i> sp. (II) 350 x 10 ⁶	190	Atoxique
3	<i>Peridinium</i> sp. 80 x 10 ⁶	Atoxique	"
4	<i>Ostreopsis siamensis</i> 9,2 x 10 ⁶	"	200
5	<i>O. siamensis</i> 9 x 10 ⁶	"	250
6	<i>O. siamensis</i> 45 x 10 ⁶	"	Atoxique
7	<i>Cryptochrysis</i> sp. 2,4 x 10 ⁹	"	"
8	<i>Chroococcopsis</i> sp. I 2 L. de culture	"	"
9	<i>Chroococcopsis</i> sp. II 2 L. de culture	"	1520
10	<i>Isochrysis</i> 1,5 x 10 ⁹	"	Atoxique
11	<i>Gambierdiscus toxicus</i> 6,4 x 10 ⁶	7500	200
12	<i>G. toxicus</i> 28 x 10 ⁶	750	1000
13	<i>G. toxicus</i> 750 x 10 ³	8000	150
14	<i>G. toxicus</i> 820 x 10 ³	3820	1600
15	<i>Prorocentrum bahamensis</i> 200 x 10 ⁶	930	2000

Fig 9 Action antibiotique de certaines algues unicellulaires marines et toxicité de quelques espèces en culture

Specific Interactions among Organisms^a

Group I (mutually advantageous relationship)

Rhodomonas ovalis $\xrightleftharpoons[183]{143}$ *Chattonella akashiwo*

Chattonella akashiwo $\xrightleftharpoons[143]{106}$ *Chattonella inlandica*

Group II (mutually exclusive relationship)

Hornellia sp. $\xrightleftharpoons[24]{56}$ *Chattonella inlandica*

Hornellia sp. $\xrightleftharpoons[9]{84}$ *Gonyaulax catenella*

Chattonella akashiwo $\xrightleftharpoons[66]{68}$ *Gonyaulax catenella*

Group III (no relationship with each other)

Prorocentrum minimum *Gonyaulax catenella*

^a Numbers show growth expressed as a percentage of the amount occurring in basal medium without additions.

Fig 10 Interactions spécifiques

Effect of Extracellular Products of Phytoplankton on the Growth of Red Tide Flagellates

Source of extracellular product	Growth (relative units)						
	Dinoflagellates			Other flagellates			
	<i>Prorocentrum micans</i>	<i>Prorocentrum minimum</i>	<i>Gonyaulax catenella</i>	<i>Chattonella akashiwo</i>	<i>Chattonella inlandica</i>	<i>Chattonella japonica</i>	<i>Hornellia</i> sp. J2
None	100	100	100	100	100	100	100
<i>Skeletonema costatum</i>	177	343	146	131	112	159	123
<i>Phaeodactylum tricornatum</i>	158	80	195	129	53	0	160
<i>Rhodomonas ovalis</i>	45	122	41	143	10	94	39
<i>Hornellia</i> sp. J1	93	144	84	147	56	120	2
<i>Chattonella akashiwo</i>	45	53	68	106	111	161	4
<i>Chattonella inlandica</i>	330	69	246	130	67	?	24
<i>Chattonella japonica</i>	100	130	100	134	21	171	21
<i>Prorocentrum micans</i>	72	40	90	137	8	176	40
<i>Prorocentrum minimum</i>	94	104	98	141	61	16	51
<i>Gonyaulax catenella</i>	109	95	30	76	66	0	9
<i>Gonyaulax catenella</i> IB	53	117	86	160	2	161	16
<i>Polykrikos schwartzi</i>	89	113	98	166	111	114	11

Fig 11 Effets inhibiteurs ou favorisants d'extraits extracellulaires sur plusieurs cultures de dinoflagellés d'eaux rouges

EQUILIBRE MICROBIOLOGIQUE OCEANIQUE

ESSAI DE SYNTHÈSE DES ACTIONS DES TÉLÉMÉDIATEURS CHIMIQUES ACTUELLEMENT CONNUS

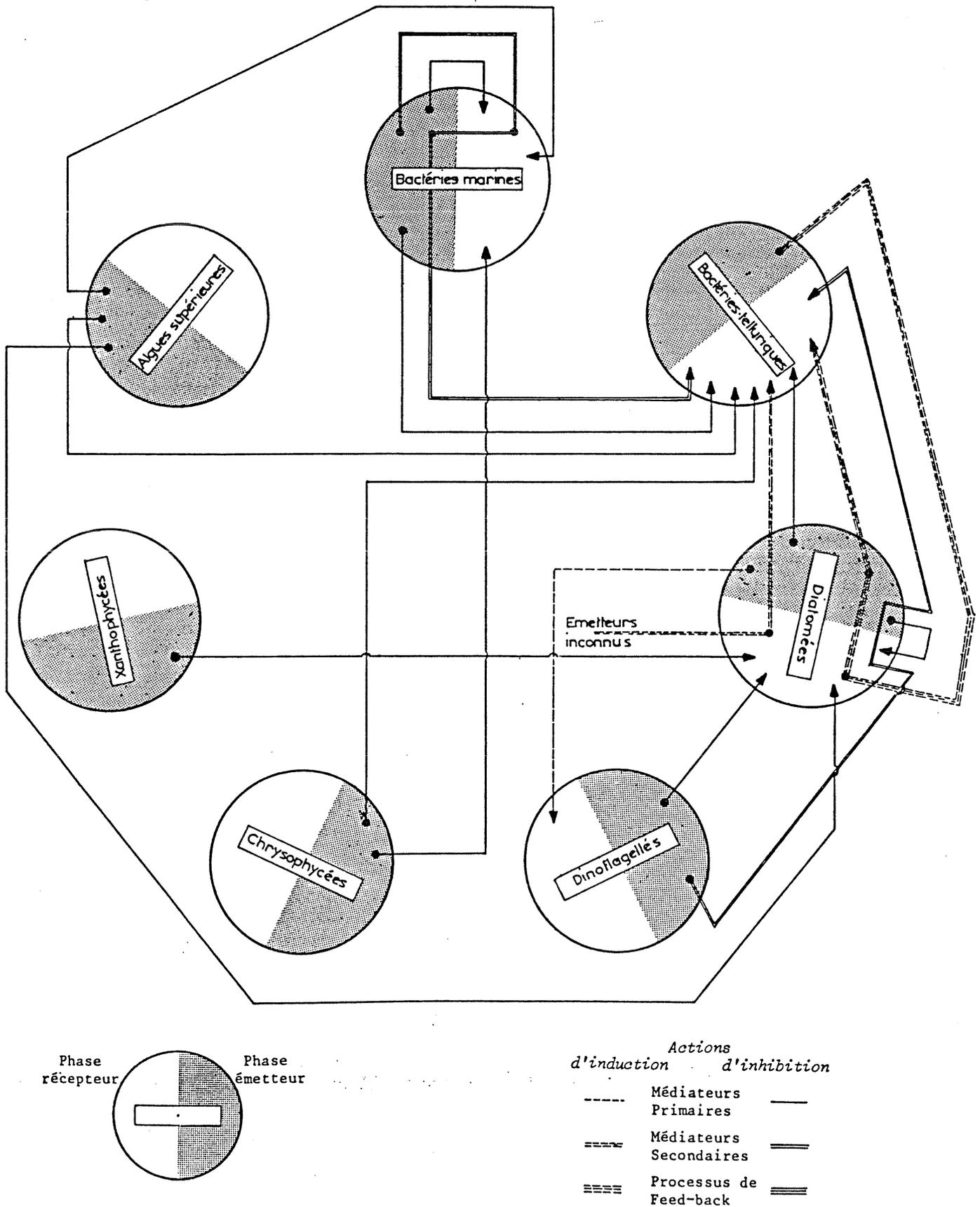


Fig 12 Théorie générale sur les télémédiateurs chimiques (AUBERT et al)

List of toxic dinoflagellates and selected parameters.

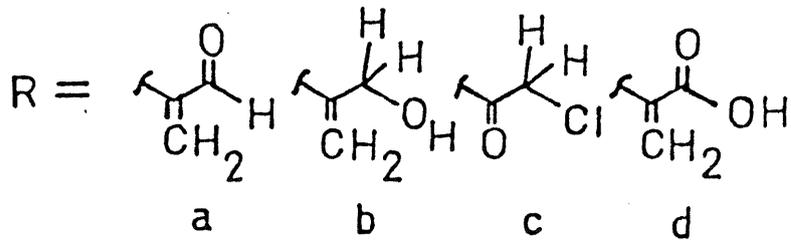
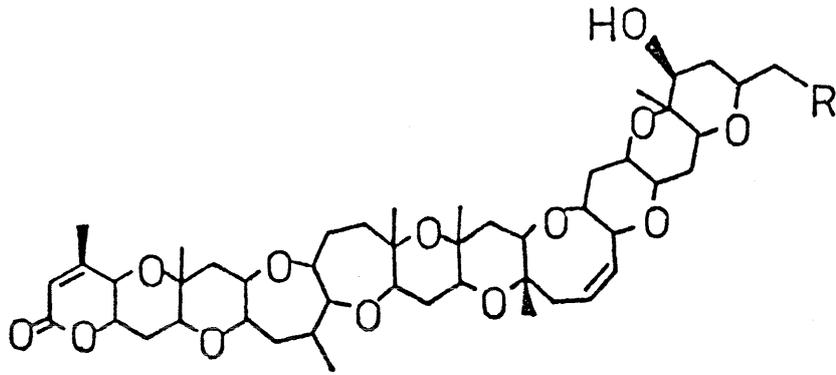
Species	Toxic lab/field	Water or organic solvent soluble	Fish kills or ichthyotoxic in lab tests or hemolytic	Ciguatera NSP, PSP or DSP	Sexual cycle known	References	Figure
1. * <i>Amphidinium carterae</i> Hulburt, 1957	L	O	I/H	-	+	Nakajima et al. 1981; Ikawa and Sasner 1975; Ikawa and Taylor 1973.	-
2. * <i>A. klebsii</i> Kofoid & Swezy emend. D. Taylor, 1971	L	O	I/H	-	ND	Nakajima et al. 1981; McLaughlin and Provasoli 1957	-
3. <i>A. rhychocephalum</i> Anissimowa, 1926	L	O	I	-	ND	McLaughlin and Provasoli 1957	-
4. <i>Dinophysis fortii</i> Pavillard, 1923	F	O	ND	DSP	ND	Yasumoto et al. 1980b; Murata et al. 1982	-
5. * <i>Gambierdiscus toxicus</i> Adachi & Fukuyo, 1979	L	O/W	H	Ciguatera	+	Adachi and Fukuyo 1979; Nakajima et al. 1981	15
6. <i>Gonyaulax monilata</i> Howell, 1953	L	W	FK/I	PSP	+	Sievers 1969; Walker and Steidinger 1979	12,13
7. <i>G. polyedra</i> Stein, 1883	L(?)	W?		-	ND	Schradie and Bliss 1962	-
8. <i>Gymnodinium catenatum</i> Graham, 1943	L/F	W		PSP	?	Morey-Gaines 1982	1
9. <i>G. veneficum</i> Ballantine, 1956	L	O	I	ND	ND	Ballantine 1956; Abbott and Ballantine 1957	8
10. * <i>Ostreopsis ovata</i> Fukuyo, 1981	L	O	H	-	ND	Nakajima et al. 1981	-
11. * <i>O. siamensis</i> Schmidt, 1901	L	W	H	-	ND	Nakajima et al. 1981	-
12. <i>Prorocentrum balticum</i> (Lohmann) Loeblich, 1970	?	O	FK		ND		-
13. * <i>P. concavum</i> Fukuyo, 1981	L	O	I/H	Ciguatera	ND	Fukuyo 1981; Nakajima et al. 1981	17
14. * <i>P. lima</i> (Ehrenberg) Dodge, 1975	L	O/W	H	Ciguatera?	ND	Dodge 1975; Fukuyo 1981; Nakajima et al. 1981; Murakami et al. 1982	16
15. <i>P. minimum</i> [incl. <i>P. minimum</i> var. <i>marie-lebourae</i>]	?				ND	Nakajima 1965	20
16. * <i>P. mexicanum</i> Tafall [= <i>P. rhyathymum</i> Loeblich, Shirley & Schmidt, 1979]	L	O	H	Ciguatera?	ND	Loeblich et al. 1979; Steidinger and Dodge 1982; Nakajima et al. 1981	19
17. <i>Protogonyaulax acatenella</i> (Whedon & Kofoid) Taylor, 1979	L	W	-	PSP	ND	Taylor 1979a	-
18. <i>P. catenella</i> (Whedon & Kofoid) Taylor, 1979	L/F	W	-	PSP	+	Taylor 1979a; Yoshimatsu 1981	9
19. <i>P. tamarensis</i> (Lebour) Taylor, 1979 [incl. var. <i>excavata</i> & <i>P. phoneus</i> (Woloszynska & Conrad) Taylor, 1979]	L/F	W	FK**	PSP	+	Taylor 1979a; Loeblich and Loeblich 1979; Turpin et al. 1978; Anderson and Wall 1978; White 1981, 1982a	10,11
20. <i>Ptychodiscus brevis</i> (Davis) Steidinger, 1979	L/F	O	FK/I/H	NSP	+(in part)	Steidinger 1979; Walker 1982; Baden 1983	2,3,4,7
21. <i>Pyrodinium bahamense</i> var. <i>compressa</i> (Böhm) Steidinger, Tester & Taylor, 1980	L/F	W	FK/I	PSP	ND	Maclean 1977; Worth et al. 1975; Steidinger et al. 1980; Harada et al. 1982	14

*Benthic species.

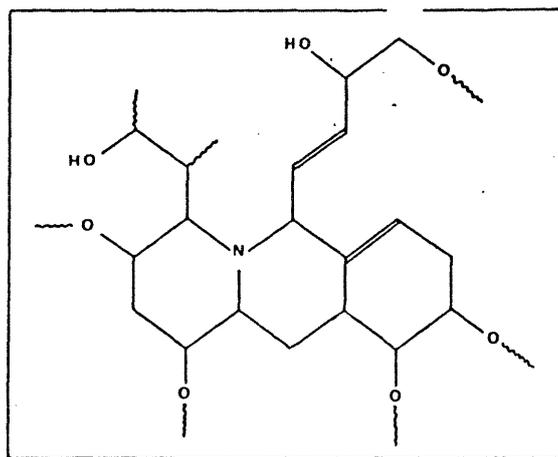
**Fish kills via food chain.

ND = no data

Fig 13 Liste des dinoflagellés toxiques actuellement connus et nature de leur toxine

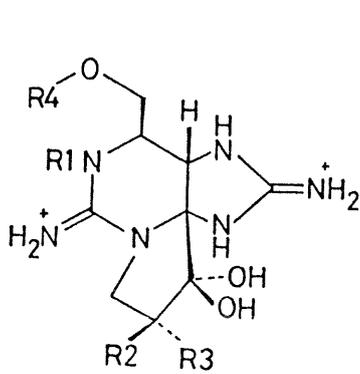


The structures of the brevetoxins. Key: a=T34, BTX-B, GB-2; b=T17, GB-3; c=BTX-C; d=oxidized T34.



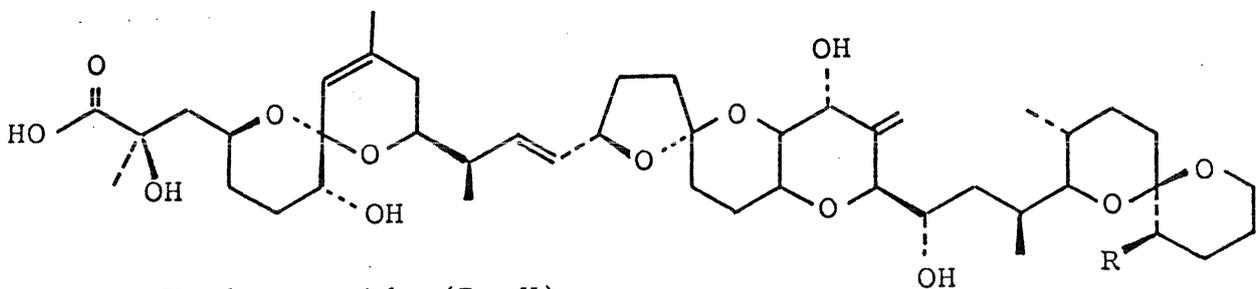
Structure partielle de la ciguatoxine (d'après Scheuer, comm. pers.).
Partial structure of ciguatoxin (from Scheuer, pers. comm.).

Fig 14 Structures moléculaires de la BTX et de la CTX



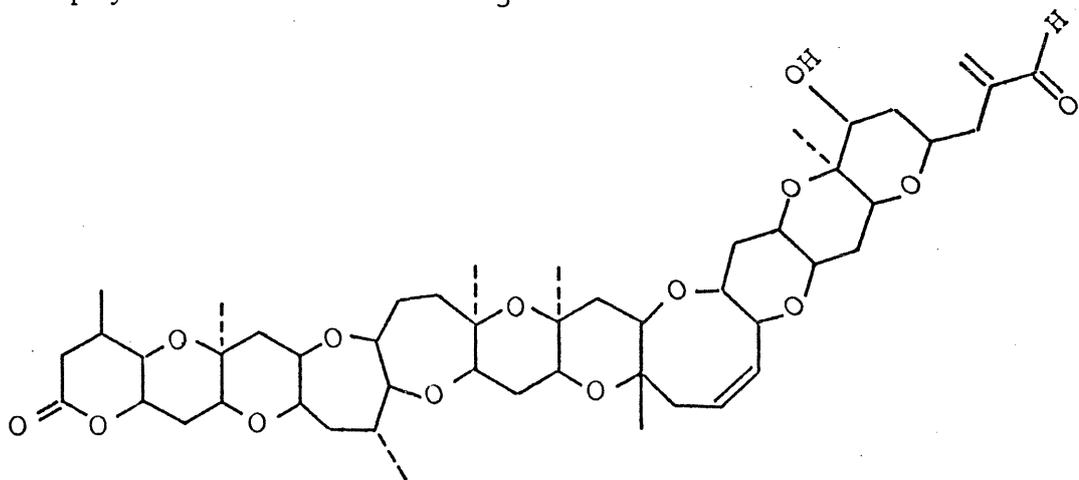
	R1	R2	R3	R4
saxitoxin	: -H	-H	-H	-CONH ₂
neosaxitoxin	: -OH	-H	-H	-CONH ₂
gonyautoxin-I	: -OH	-H	-OSO ₃ ⁻	-CONH ₂
gonyautoxin-II	: -H	-H	-OSO ₃ ⁻	-CONH ₂
gonyautoxin-III	: -H	-OSO ₃ ⁻	-H	-CONH ₂
gonyautoxin-IV	: -OH	-OSO ₃ ⁻	-H	-CONH ₂
gonyautoxin-V	: -H	-H	-H	-CONHSO ₃ ⁻
gonyautoxin-VI	: -OH	-H	-H	-CONHSO ₃ ⁻
gonyautoxin-VIII	: -H	-OSO ₃ ⁻	-H	-CONHSO ₃ ⁻
" epimer	: -H	-H	-OSO ₃ ⁻	-CONHSO ₃ ⁻
decarbamoyle-saxitoxin	: -H	-H	-H	-H

Structures of paralytic shellfish toxins.



Okadaic acid (R = H)

Dinophysistoxin-1 (R = CH₃)



Brevetoxin B

Dinoflagellate toxins with polyether structures.

Fig 15 Structures moléculaires de la Saxitoxine, de l'Acide Okadaïque et de la Brevetoxine B