

LE CONTRÔLE DE LA PRODUCTION MARINE
SOURCE DE PROTEINES ET EPURATION BIOLOGIQUE

par

Lucien LAUBIER

Chef du Département Scientifique du C.O.B.

Centre National pour l'Exploitation des Océans

De manière très schématique, les écosystèmes marins peuvent être classés en deux grandes catégories: les écosystèmes oligotrophes et les écosystèmes eutrophes. Les écosystèmes oligotrophes sont caractérisés par des communautés végétales et animales dont la composition est stable au cours du temps, et dans lesquelles la totalité des sels minéraux nutritifs disponibles est transformée en matière organique vivante par le jeu de la photosynthèse. La production de ces systèmes est à peu près égale aux dépenses métaboliques, et la vie se maintient par un recyclage continu des éléments nutritifs. En termes d'exploitation, de tels écosystèmes ne fournissent qu'un faible rendement annuel, de l'ordre de quelques kilos à quelques dizaines de kilos à l'hectare au niveau des espèces carnivores recherchées par l'homme, situées au sommet de la pyramide alimentaire. Les écosystèmes eutrophes, au contraire, atteignent rarement le même niveau de complexité et de stabilité dans le temps. Les sels minéraux apportés au système de façon continue et en grande quantité permettent d'atteindre des valeurs de production photosynthétique très élevées. Si les processus de décomposition des matières organiques mortes ne se déroulent pas à une vitesse suffisante pour équilibrer la production, ces matériaux organiques peuvent s'accumuler jusqu'à atteindre un niveau excédant les capacités du milieu. Ces conditions extrêmes aboutissent à un phénomène catastrophique, avec apparition de zones entièrement dépourvues d'oxygène et pratiquement azoïques. Ce processus a été bien souvent décrit dans les lacs d'eau douce recevant une charge minérale ou organique d'origine humaine excessive: il s'agit du phénomène d'eutrophisation. Lorsque la vitesse de minéralisation des déchets organiques équilibre la production de matière vivante du système, de très faibles perturbations d'ordre physique ou chimique suffisent à provoquer de fortes oscillations des niveaux de production et de respiration. C'est un système en équilibre fondamentalement instable, avec une évolution permanente entre deux limites de production et de consommation d'oxygène. Si les oscillations revêtent une amplitude suffisante, les phénomènes d'eutrophisation catastrophique, entraînant des mortalités importantes de la flore et de la faune, apparaissent régulièrement.

Cette alternance entre phases productives et phases destructrices a un effet prononcé sur la composition biologique de tels écosystèmes.

Les espèces carnivores de grande taille et à croissance lente ne parviennent pas à s'établir de manière permanente. Au contraire, les espèces herbivores de petite taille, à vie courte et capable de produire de véritables explosions démographiques, prédominent. Ceci est vrai aussi bien pour les espèces vivant sur le fond que pour les formes planctoniques. C'est également vrai pour les poissons pélagiques, qui sont représentés par de petites espèces à croissance rapide comme les Clupéidés. Ces Clupéidés à régime alimentaire planctonophage se nourrissent aux dépens des populations de petits herbivores pélagiques comme les Crustacés Copépodes. Cette réduction de la pyramide alimentaire est d'autant plus marquée que l'eutrophisation est plus forte, et à la limite les petites formes herbivores ou mangeuses de particules organiques prédominent et représentent du point de vue de l'exploitation de ces communautés une véritable impasse énergétique.

Les écosystèmes eutrophes se rencontrent dans les océans le long des côtes Ouest des continents dans la région intertropicale: sous l'action des vents alizés, les masses d'eau superficielles côtières sont entraînées vers le large, ce qui provoque la montée en surface d'eaux profondes riches en sels minéraux. Une fois éclairées, échauffées et ensemencées, ces eaux profondes sont le support d'une forte production primaire végétale exploitée par des populations denses de petits herbivores pélagiques.

D'un point de vue théorique, l'instabilité fondamentale des écosystèmes eutrophes conduit à rejeter toute technique d'enrichissement artificiel des océans par déversement massif de matières minérales ou organiques. Prétendre accroître la production marine par un apport non contrôlé de substances nutritives dans le milieu risque de conduire à des catastrophes, et apparaît au mieux comme une technique peu efficace et dont les effets sont difficilement prévisibles (RYTHER et al., 1972).

Le contrôle de la production marine se pose donc de deux manières: peut-on accroître de façon régulière et prévisible le niveau de production, peut-on éviter les conditions d'instabilité qui caractérisent fondamentalement les écosystèmes naturels eutrophes? Jusqu'à une date récente, les quelques expériences d'enrichissement des océans ont été réalisées dans des zones côtières confinées (fjords norvégiens et écossais, baies de la côte yougoslave). Les éléments enrichissants déversés étaient le plus souvent des engrais agricoles. Les résultats les plus récents ont été obtenus en Adriatique: la fertilisation d'une baie de quelques deux cents hectares a été obtenue à raison de 117 kg de superphosphates à l'hectare, soit 37,7 mg/m³ de P-PO₄. La croissance pondérale d'huitres en élevage a été cinq fois plus forte qu'avant enrichissement. Par contre, la forte teneur en phosphates a amené la formation de zones réduites, avec dégagement de H₂S au niveau du fond. On a également constaté des proliférations phytoplanctoniques nocives (Péridiniens) et de Cyanophycées sur le fond de certaines zones (BULJAN, 1961).

Depuis quelques années, des expériences d'enrichissement d'un type bien différent sont entreprises aux Etats-Unis, dans le but de contrôler la production marine en recherchant un niveau maximal. La France s'est engagée récemment dans cette voie dans le cadre d'un programme national proposé par le CNEXO, le programme Ecotron. Quelques considérations théoriques sont nécessaires avant de présenter les résultats actuels.

PRODUCTION POTENTIELLE DES ECOSYSTEMES EUTROPHES

Dans un système clos dans lequel les sels nutritifs et le CO₂ nécessaires à la photosynthèse sont fournis en excès, la production primaire sera limitée uniquement par l'éclairement solaire. Dans ces conditions, la valeur maximale théorique est à peu près la même pour une vaste gamme d'écosystèmes terrestres ou aquatiques: 200 tonnes en poids végétal frais par hectare et par an en région tempérée. Entièrement utilisée par des animaux herbivores, cette production végétale peut être transformée avec un rendement de 10 à 20% pour fournir 20 à 40 tonnes de chair à l'hectare et par an. Dans le cas d'une chaîne à trois niveaux, la production annuelle de l'espèce carnivore sera de 2 à 4 tonnes en poids frais. Un tel système ne peut être en équilibre que si les végétaux produisent une quantité d'oxygène photosynthétique équivalente aux besoins respiratoires de l'ensemble du système. Il faut d'autre part que la biomasse instantanée soit maintenue à sa valeur maximale par prélèvements. En pratique le système ne doit jamais se structurer aussi bien du point de vue physique (stratification) que du point de vue fonctionnel et les différents processus de production (photosynthèse, respiration, assimilation, excrétion, minéralisation) doivent se dérouler à une vitesse constante au cours du temps. Le contrôle d'un tel système n'est guère possible, car l'apport d'énergie extérieure (éclairement solaire) est hautement variable au cours de l'année (de 1 à 20 en région tempérée) et les variations à courte période (journalière) sont également élevées (de 1 à 10). C'est pour cette raison que les productions obtenues dans certains élevages en zone tropicale restent bien inférieures aux valeurs théoriques: quelques tonnes/ha/an pour les herbivores et quelques centaines de kilos/ha/an pour les carnivores, soit le dixième de la valeur maximale théorique.

Par contre, certaines formes d'élevage permettent d'obtenir des rendements bien supérieurs: la technique d'élevage des moules en culture suspendue dans les rias atlantiques espagnoles permet d'obtenir de 300 à 600 tonnes de poids frais/ha/an. Les moules se nourrissent en fait sur un volume d'eau bien supérieur à la surface couverte par les structures d'élevage par suite des courants de marée. On a calculé qu'un radeau de 700 m² de surface reçoit journallement un apport de nourriture sous forme de phytoplancton et de particules organiques de l'ordre de 10 tonnes en poids frais. Du point de vue écologique, ces rendements extraordinaires n'ont guère de sens: si l'on tient compte du volume d'eau réel utilisé, les chiffres de rendement obtenus sont du même ordre que les valeurs théoriques indiquées dans le cas d'un système clos. La technique d'élevage suspendu, très intéressante pour l'éleveur, n'accroît pas la production biologique de l'océan.

On retrouve le même paradoxe dans le cas des élevages intensifs d'espèces carnivores (crevettes Penaeidés, poissons Carangidés et Salmonidés par exemple en eau de mer): les rendements obtenus varient de 20 à 100 tonnes/ha/an en poids frais. Le contrôle de la production marine peut-il combiner les valeurs théoriques maximales de production primaire avec ces techniques d'élevage intensif en vue d'accroître la production marine?

LES CONDITIONS DU CONTRÔLE DE LA PRODUCTION

L'élément essentiel du contrôle de la production réside évidemment dans la séparation physique complète entre le niveau producteur et le ou

les niveaux consommateurs. Considérons par exemple le cas simple d'une chaîne alimentaire à deux niveaux, des algues phytoplanctoniques comme producteurs et des Mollusques filtreurs comme consommateurs (huîtres). Des cultures en grand volume avec éclairage naturel ont déjà été réalisées notamment sur des Chlorelles au Japon: sans régulation de température, on a obtenu sur de longues périodes une production hivernale de 4,4/g/m²/jour en poids sec, et une production estivale de 16 g/m²/j. La moyenne annuelle est de 8,6 g/m²/j, soit une production annuelle de 160 tonnes/ha en poids frais. Un bassin de 1 ha, pour une profondeur d'une vingtaine de centimètres, peut produire journalièrement 1000 m³ de culture de phytoplancton pour nourrir les mollusques, soit un débit de 40 m³/h. Avec un rendement de transfert de 10% seulement, il est possible d'obtenir 16 tonnes/an de poids frais de chair d'huîtres. Par contre, la quantité d'oxygène dissous ainsi apportée aux huîtres est très insuffisante. Pour une valeur de 6 ml O₂/l à l'entrée, et une valeur résiduelle minimale de 3 ml O₂/l à la sortie, le débit d'eau nécessaire pour satisfaire aux besoins respiratoires de 10 tonnes d'huîtres (poids de chair) est certainement supérieur à 1000 m³/h, soit 25 fois plus élevé que le débit de la culture d'algue. Il est donc nécessaire de disposer d'un système de circulation d'eau indépendant de l'apport de phytoplancton, ce qui présente l'intérêt de ramener la densité algale à des valeurs compatibles avec un rendement d'assimilation optimal par les huîtres: en effet, les cultures non diluées atteignent couramment 10⁶ cellules/ml, alors que les huîtres rejettent une grande partie des algues retenues sur leurs filtres branchiaux pour des densités de l'ordre de 10⁵ c/ml, sous forme d'agrégats de cellules englués de mucus, les pseudofèces. Du point de vue économique, l'importance des débits mis en jeu constitue une difficulté, qui peut être réduite en utilisant les variations naturelles de niveau dans les mers à marées, ou en faisant appel à une eau déjà pompée pour d'autres utilisations (notamment les eaux de mer de refroidissement industriel).

LA SOURCE DE SELS NUTRITIFS

Pour des profondeurs de bassin de culture de l'ordre du mètre, on a montré que le carbone apporté sous forme de CO₂ dans l'eau de renouvellement ne constituait pas un facteur limitant. Il n'en est évidemment pas de même pour les sels nutritifs minéraux, et trois sources d'approvisionnement en sels peuvent être considérés: les engrais agricoles classiques, les eaux profondes océaniques, enfin les rejets liquides des stations d'épuration. Pour simplifier l'exposé, seul le cas de l'azote qui représente un constituant majeur des végétaux sera considéré. Dans l'exemple proposé, la production annuelle de 160 tonnes/ha de poids végétal frais correspond à 32 tonnes en poids sec. Pour une teneur en protéines de 50% du poids sec, la quantité d'azote serait de 8% du poids sec total (coefficient classique de 6,25 entre poids d'azote et poids protéique), soit 2.560 kilos de N. Pour des raisons économiques évidentes, la solution faisant appel à des engrais agricoles d'origine industrielle peut être d'emblée éliminée. L'utilisation d'eaux profondes suscite actuellement un certain intérêt. A 800-1000 m de profondeur, la teneur en N de l'eau de mer est voisine ou supérieure à 10 micro.at.g N/l, soit 280 mg N/m³. Par ailleurs, les eaux profondes contiennent en quantité suffisante les autres éléments minéraux nécessaires à la photosynthèse. Dans le cas d'un bassin de 20 cm de profondeur, on obtient à raison d'une

production journalière de la moitié du volume total une valeur de 28 mg de N/m², permettant une production théorique de 0,35 g/m² en poids sec de matière végétale par jour, soit une production très inférieure à la valeur moyenne possible en zone tempérée (8,6 g/m²/j). On peut bien entendu accroître la profondeur du bassin, mais il faudrait atteindre une profondeur de l'ordre de 25 m pour disposer d'un apport optimal de N, profondeur incompatible avec une bonne utilisation de l'énergie solaire. Il serait d'autre part difficile de maintenir une bonne homogénéité de la culture pour de telles profondeurs.

En pratique, une expérience de ce type est menée depuis quelques années sur l'île de Ste Croix, archipel des Iles Vierges, au Sud-Est de Porto-Rico, où les fonds de 1000 m sont situés à une distance horizontale de la côte de l'ordre de 1 mille marin. Il s'agit d'un projet à buts multiples, l'eau pompée devant servir également à la production de frigories et d'eau douce, voire même d'énergie (procédé G. CLAUDE). La première installation de pompage fournit un débit de 800 m³/h d'une eau captée à 800 m de profondeur dont la teneur en azote est de l'ordre de 25 micro.at.g. de N-NO₃/l. Les essais de culture de phytoplancton ont permis d'obtenir des productions journalières élevées, de l'ordre de 20 g/m² en poids sec végétal. Un bassin expérimental de 900 m³ a été réalisé. Alimenté en eau profonde à raison de 60 m³/h, son taux de renouvellement est beaucoup trop élevé pour permettre une utilisation optimale du N. Une valeur de l'ordre de 20 m³/h, compatible avec la vitesse de multiplication du phytoplancton, n'apporterait par contre que le tiers de la quantité d'azote nécessaire. Des résultats intéressants ont été obtenus au plan biologique en ce qui concerne la croissance de diverses espèces de Bivalves. Par contre, il ne semble pas que l'ensemble du système producteurs/consommateurs fonctionne de manière satisfaisante, et notamment fournisse des valeurs de production journalière phytoplanctonique proches des valeurs atteintes en culture de laboratoire (ROELS et al., 1971).

Quel que soit l'intérêt de ce type de recherche, il existe une autre source de sels nutritifs minéraux, beaucoup moins onéreuse, et qui pose en outre de nombreux problèmes de pollution côtière: il s'agit des rejets liquides provenant des stations d'épuration des rejets domestiques situées en bordure du littoral. Il paraît à priori particulièrement intéressant de rechercher une utilisation biologique de ces eaux usées dans un système intégré permettant à la fois de faire subir un véritable traitement biologique aux effluents et de produire par élevage des espèces d'intérêt commercial. Woods Hole Oceanographic Institution, un des grands Centres Océanographiques américains situé dans le Massachusetts, a entrepris depuis cinq ans d'importantes recherches en ce domaine, recherches qui ont permis d'aboutir récemment à la réalisation d'un système expérimental.

Les premières expériences de laboratoire ont permis de réaliser dans des enceintes de 15 litres des cultures continues d'algues phytoplanctoniques à partir d'un effluent domestique dilué (10 à 20% d'effluent dans l'eau de mer introduite dans l'enceinte). Avec un taux de renouvellement de l'eau de 50% du volume total de la culture par jour, des concentrations de l'ordre de 0,5 à 1 x 10⁶ c/ml ont été obtenues pendant plusieurs mois, aussi bien sur des cultures monospécifiques que

plurispécifiques réalisées à partir d'inoculats de populations phytoplanctoniques naturelles locales. On assiste toujours dans ce dernier cas à une forte réduction de la diversité spécifique. Les cultures ont été utilisées dans des bassins de 20 m³ pour nourrir des huitres, et plus de 20% de la production végétale a été transformée en chair de Mollusque, valeur équivalente rendement théorique maximum admis actuellement.

A la suite de ces essais préliminaires, une installation pilote de dimensions significatives du point de vue économique a été réalisée (HUGUENIN, 1975). Cette installation comprend tout d'abord six bassins à ciel ouvert pour la culture du phytoplancton. Chaque bassin a une surface de 186 m² (=2000 pieds²) et une profondeur réglable depuis 15 cm jusqu'à 90 cm. L'étanchéité est assurée par une feuille de polychlorure de vinyl de 0,5 mm d'épaisseur disposée sur une surface de sable mise en forme. Dans les parties les plus exposées au soleil et aux manipulations, une seconde feuille de polychlorure de vinyl est ajoutée. De tels bassins faciles à réaliser ont une durée de vie escomptée de 5 ans. La seconde partie du système comprend 8 "raceways" de dimensions différentes: 5 d'entre eux ont une largeur de 1,22 m, et 3 d'entre eux une largeur double de 2,44 m. Longueurs et profondeurs sont identiques pour les deux séries: 12,20 m de longueur et de 0 à 1,52 m de profondeur. Ces raceways sont construits en ciment, et sont susceptibles de fonctionner en série ou en parallèle, avec une entrée d'eau à chaque extrémité. L'ensemble des tuyauteries d'alimentation et de sortie de l'eau est prévu pour un débit maximal de 1895 l/mn pour chaque raceway. Le circuit de pompage d'eau de mer est réalisé en résine armée de fibres de verre et en polyéthylène haute densité. Deux pompes permettent d'obtenir un débit de 2460 l/mn (avec une seule pompe) ou de 3790 l/mn (avec deux pompes). Le circuit de retour à la mer comporte un bassin à ciel ouvert de 160 m² réalisé selon la même technique que les bassins de culture d'algues. Dans ce bassin peuvent être effectués des essais de culture d'algues pluricellulaires à partir des sels minéraux résiduels ou provenant de l'excrétion des animaux élevés dans les raceways. Un laboratoire humide situé entre les bassins de phytoplancton et les raceways d'élevage permet de réaliser un certain nombre d'expériences plus fines. Ce laboratoire contient également les compresseurs fournissant l'air comprimé pour l'oxygénation des bacs intérieurs d'expérience, ainsi que les appareils de filtration et de thermorégulation de l'eau de mer pour les expériences se déroulant à l'intérieur du laboratoire. Enfin, un système d'alarmes comportant 24 points de mesure permet le contrôle des niveaux d'eau dans les bassins, de la température de l'eau de mer, de la pression d'air comprimé et du fonctionnement des filtres. L'ensemble à ciel ouvert de ce système a été calculé pour une charge journalière en effluents domestiques correspondant à 500 personnes et une production de chair de Mollusques consommables de l'ordre de 4 tonnes/an. Les filtres à sable utilisés permettent un débit de 1,9 m³/mn et retiennent les particules jusqu'à une taille de 20 microns. Chaque filtre est nettoyé automatiquement par contre-courant à raison de 15 minutes toutes les 8 heures. Le système de chauffage de l'eau de mer comporte quatre échangeurs de taille différente. Le plus puissant peut élever la température de l'eau de 22°C avec un débit de l'ordre de 760 l/mn. Cet échangeur débite dans les 5 raceways les plus petits, avec mélange de l'eau échauffée avec de l'eau de mer non échauffée de manière à obtenir une température déterminée. A l'exception du pompage et du pass-

age dans les filtres, l'eau de mer circule par gravité entre les différents bassins ou bacs.

La conception et la réalisation d'un tel système ont été rendues possibles à la suite d'un certain nombre d'essais plus limités, aussi bien en ce qui concerne la complexité écologique que les dimensions des bassins. Ces essais préliminaires généralement limités dans le temps à moins d'une année ont été largement décrits dans une série de publications récentes (bibliographie in RYTHER et al., 1975). Le bilan général de l'azote a été particulièrement bien étudié dans deux séries d'essais réalisées au cours de l'année 1973.

Le système utilisé dans ces deux expériences est constitué par deux chaînes comprenant chacune un bassin de culture d'algues de 2,27 m de diamètre contenant 2020 litres de culture. Les cultures obtenues sont envoyées dans un bassin destiné aux animaux herbivores filtreurs de 4 m² environ de surface pour une profondeur de 80 cm. L'eau sortant de ce bassin est conduite dans deux bassins successifs de 1,12 m de diamètre et contenant 355 l d'eau, destinés à la culture de grandes algues. Les deux séries diffèrent par les espèces animales: huitres associées à une Polychète sédentaire Capitella capitata contre huitres associées à une Polychète errante Nereis virens dans les bassins intermédiaires, une algue rouge Chondrus crispus contre une algue verte Ulva lactuca dans les deux bassins circulaires terminaux. Les Polychètes sont utilisées pour la récupération des excréments et des pseudofèces des huitres, et les grandes algues pour assimiler les sels minéraux dissous résiduels et provenant de l'excrétion des animaux du bassin intermédiaire. Le système est alimenté par gravité. Les eaux usées provenant d'une station d'épuration à traitement secondaire sont mélangées avec de l'eau de mer naturelle filtrée à un micron. Les bassins intermédiaires contiennent chacun 2000 jeunes huitres. La culture d'algues s'y déverse en continu à raison de 0,35 l/mn, à quoi s'ajoute un apport d'eau de mer filtrée à 100 microns à raison de 5 à 8 l/mn. L'eau sortant du bassin intermédiaire traverse en totalité les deux bassins terminaux, dans lesquels la biomasse algale est maintenue par prélèvement à une valeur de 5 kg en poids frais. L'expérience a duré six mois sans interruption. Le contrôle chimique du système est assuré par une mesure trois fois par semaine de l'azote total inorganique ($\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$) et la mesure deux fois par jour du pH, de l'azote particulaire et du carbone particulaire.

Dans la première série, le mélange d'eau usée et d'eau de mer a varié de 30 à 67% d'eau usée, ce qui correspond à une variation de l'azote total (NT) de 5 à 10 mg/l et de la salinité de 20 à 10‰. La culture est extraite à raison de 0,5 fois le volume total par jour. Dans tous les essais, la production d'azote particulaire (NP) représentant la biomasse phytoplanctonique augmente avec l'accroissement de NT jusqu'à une valeur de 3 à 4 mg/l. La valeur correspondante de NT est alors de 8 mg/l, ce qui signifie qu'une fraction de l'ordre de 50% de l'apport d'azote est inutilisée. L'utilisation de cette fraction dépend étroitement du rapport $\text{NH}_4\text{-N}/\text{NT}$, ce qui correspond du point de vue biologique à une inhibition de la nitrate réductase du phytoplancton par des valeurs trop élevées d'ammoniac. D'autre part, pour des valeurs élevées du rapport $\text{NH}_4\text{-N}/\text{NT}$, on constate un accroissement relatif du taux d'utilisation, qui s'explique vraisemblablement par un départ vers l'atmosphère d'une partie de l'azote minéral sous forme de NH_3 : en fin d'après-midi, ce phénomène provoque de

fortes montées du pH, de 7,3-7,6 à 10,1-10,3 lorsque le système tampon de l'eau est déséquilibré par la forte assimilation carbonée du phytoplancton. Pour de telles valeurs du pH, NH₃ non ionisé constitue la plus grande partie du NT, et l'agitation de l'eau des bassins favorise le départ de NH₃ vers l'atmosphère. Bien que les algues se développent normalement pour des teneurs de 67% d'eau usée, l'utilisation optimale correspond à des valeurs de 40 à 50% seulement.

Dans la seconde série, la proportion d'eau usée est maintenue constante à 50%, et le taux d'extraction de la culture varie: 0,25, 0,50, 0,75 et 1 fois le volume total par jour. Dans ces conditions, la valeur du NP décroît linéairement lorsque le taux d'extraction augmente: 5 mg/l pour un taux d'extraction de 0,25, 3 mg/l pour 0,75 et 2 mg/l pour un taux de 1. La combinaison de ces deux séries de résultats permet de définir des valeurs optimales de production végétale: 1g/m²/j de NP pour un taux de dilution de 50% et un taux d'extraction de 0,75/j, pour la nourriture des huitres. La meilleure croissance des grandes algues situées dans les bassins terminaux est obtenue par contre pour des valeurs plus fortes du taux de dilution et du taux d'extraction: les huitres reçoivent alors moins de nourriture sous forme de NP, mais les algues bénéficient du NT inorganique plus fort.

Bien que les bassins de phytoplancton aient reçu au départ un inoculat naturel plurispécifique, seules des Diatomées pennées se sont développées pendant toute la durée de l'expérience: Phaeodactylum tricornutum de mai à mi-juin, puis une navicule non déterminée jusqu'à mi-août, enfin une Amphora jusqu'à la fin de l'expérience. Le bilan du NT au cours des six mois d'expérience à travers les bassins intermédiaires à huitres et les deux bassins terminaux à grandes algues, à l'exclusion de l'azote apporté par l'eau de mer introduite au niveau des bassins intermédiaires, correspond à une épuration de 90% dans la première série et de 99% dans la seconde série:

Valeurs moyennes des charges en NT en g/j

Séries	Entrée bassins à huitres				Entrée bassins algues		Effluent fin.	
	Amont Phyto	Aval Phyto	Eau de mer	Total	I	II	Total	Eau de mer ex.
I	3,06	1,43	0,55	1,98	2,46	1,61	0,85	0,30
II	3,09	1,34	0,53	1,87	2,56	1,25	0,56	0,03

Il n'a pas été possible de distinguer dans l'azote inorganique régénéré à la sortie des bassins intermédiaires la part revenant aux huitres et celle revenant aux Polychètes. Le taux de régénération est de 30% environ dans la première série, contre 40% dans la seconde. Ces valeurs plus élevées que certains résultats antérieurs correspondent à une augmentation de la charge en animaux dans les bassins intermédiaires. Au niveau terminal, la seconde série (Ulva lactuca) montre une meilleure assimilation de l'azote inorganique que la première (Chondrus crispus): 60% de NT est retenu dans le premier bassin de la seconde série, contre 53% dans l'homologue de la première série. En plus, le rapport C/N des ulves passe de 7,8 dans le premier bassin à 10,0 dans le second, ce qui témoigne d'un manque d'azote dans le second bassin. Au contraire, ce rapport reste constant (8,6 à 8,9) entre les deux bassins contenant le Chondrus. Bien que l'ulve apparaisse donc comme un meilleur épurateur de l'azote inorganique résiduel, elle présente deux inconvénients: tout d'a-

bord, dans les conditions d'élevage, l'ulve devient rapidement fertile et libère des spores, ce qui représente une importante perte de biomasse. D'autre part, cette algue est pratiquement sans valeur commerciale (bien qu'elle puisse être utilisée comme engrais en agriculture), alors que le Chondrus a une valeur élevée du fait de son importante teneur en carragénanes.

Ces résultats certes encore préliminaires peuvent être considérés comme très encourageants, en particulier dans la mesure où ils ont permis de démontrer sur une assez longue période de temps la validité des bases théoriques. D'autre part, la possibilité d'obtenir une épuration presque totale de l'eau de mer par l'intermédiaire de la chaîne alimentaire créée dans les bassins est particulièrement intéressante en tant que traitement tertiaire des eaux résiduaires.

La mise en service du complexe décrit ci-dessus a débuté à la fin de 1973, et les résultats publiés actuellement demeurent préliminaires. Au cours de l'hiver 1973-74, deux bassins de production de phytoplancton ont été mis en service en maintenant la température de l'eau à 15°. Pour des raisons logistiques, l'apport d'eau résiduaire a été remplacé par un mélange de sels minéraux et d'eau douce. Dans des conditions de taux de dilution de 50% et de taux d'extraction de 0,30/j, au bout de quelques semaines, il a été obtenu une culture à peu près pure de la Diatomée Phaeodactylum tricornutum à une densité d'environ 10^6 c/ml. A partir d'avril 1974, le chauffage a pu être supprimé, et le mélange de sels minéraux remplacé par un apport journalier de 30.000 l d'eau résiduaire par bassin. Chaque bassin produit chaque jour 45.000 l de culture, distribués dans les raceways d'élevage animal. Dans un de ces raceways ont été introduits 150.000 naissains de l'huitre Crassostrea virginica accompagnés de quelques individus de Nereis virens. Un second raceway a reçu 150.000 naissains de clams Mercenaria mercenaria accompagnés de 1400 jeunes Nereis. Dans un autre raceway, la Polychète accompagnatrice des huitres est Capitella capitata; dans le même raceway, 500 flets américains (Pseudopleuronectes americanus) ont été ajoutés par la suite. Enfin, les raceways suivants utilisés comme bassins terminaux ont été garnis de Chondrus crispus. Fin 1974, l'ensemble du complexe était en opération. On ne dispose pas encore de résultats quantitatifs précis sur le fonctionnement de ce pilote. Une chaîne nouvelle a également été créée: la production journalière d'un bassin de phytoplancton est déversée dans un bassin identiqueensemencé à l'origine avec des nauplii d'Artemia salina. Une population dense d'artémias s'est rapidement installée et se reproduit dans le bassin. La production correspondante (45.000 l/j) est utilisée pour des essais d'élevage de poissons planctonophages en raceway.

Parmi les recherches nouvelles à entreprendre autour de ce complexe, les responsables américains du projet insistent à juste titre sur le devenir des germes pathogènes, des virus et de polluants industriels (par exemple les métaux) contenus dans les eaux résiduaires utilisées. Les conditions idéales d'une approche quantitative réelle de ce problème grave sont en effet réunies dans un tel système.

LE PROGRAMME FRANCAIS "ECOTRON"

A la suite de ces recherches, le CNEXO a établi fin 1974 les bases d'un programme national de recherche, le programme ECOTRON. L'objectif général de ce programme est d'apporter des éléments de réponse à un en-

semble de questions liées à l'aménagement rationnel et à l'exploitation optimale des ressources marines vivantes en zone côtière et lagunaire à travers une expérimentation scientifique systématique conçue selon une échelle dimensionnelle et une complexité écologique croissantes. Le développement de l'aquaculture exigera une quantité croissante de nourriture, ce qui implique une meilleure utilisation des processus de production en zone littorale. Parallèlement, une des problèmes majeurs posés par l'urbanisation et l'industrialisation du littoral réside dans la recherche des possibilités d'utilisation de certains rejets pouvant avoir une influence bénéfique, comme les rejets domestiques après minéralisation, les rejets agricoles d'origine animale, les effluents chauds industriels, etc.

Ce programme a été présenté dans ses grandes lignes à la communauté scientifique nationale sous la forme d'un véritable appel d'offres. Pour la plupart, les laboratoires côtiers de biologie marine ont manifesté un réel intérêt pour ce programme, et les propositions reçues, après une nécessaire sélection, ont permis de définir un programme concret pour 1975-76. Ce programme, qui représente un changement d'orientation plus ou moins marqué selon les domaines, et qui par ailleurs fait intervenir une quinzaine d'équipes de recherche réparties dans près d'une dizaine de laboratoires, n'a pu parvenir dans cette première phase au niveau actuel de cohérence et d'homogénéité des projets américains. Beaucoup plus analytique, le programme français s'est également attaché à aborder certains problèmes importants et négligés jusqu'à présent, tel celui des processus de minéralisation d'une charge organique dans un sédiment marin.

Parmi les principaux résultats préliminaires acquis après une année à peine d'activité, un certain nombre de points doivent être soulignés. En ce qui concerne le phytoplancton, de nombreux essais de laboratoire ont permis de préciser les réactions de souches d'algues isolées à divers polluants chimiques; des cultures de masse selon la technique dite du bloom dans des volumes de 5 m³ ont permis d'obtenir les hautes densités cellulaires recherchées. Les premiers essais d'utilisation d'eau résiduaire comme source de sels minéraux ont été réalisés en bloom au laboratoire, ainsi qu'en culture continue: dans ce dernier cas, il a été démontré que dans certaines limites la production primaire journalière d'un volume de quelques litres était indépendante du flux traversant le système. Cette expérience effectuée à la Station Biologique de Villefranche-sur-Mer doit être reprise en extrapolant largement le volume de l'enceinte. Les conditions de développement de diverses populations phytoplanctoniques naturelles pour des taux de dilution variables ont permis de confirmer l'aptitude des Diatomées aux basses salinités (20 à 30‰) par une équipe du Centre d'Océanographie d'Endoume-Luminy à Marseille.

Au niveau des élevages d'animaux herbivores, de nombreuses espèces de filtreurs et de mangeurs de particules organiques déposées ont été testées en laboratoire. Une attention particulière a été portée au problème de l'élevage de jeunes Bivalves commerciaux produits en éclosérie à partir de populations phytoplanctoniques mono- et plurispécifiques: le contrôle des paramètres écologiques et trophiques est particulièrement important pour le naissain d'éclosérie qui est habituellement fourni à une taille de l'ordre de quelques millimètres (LUCAS, sous presse).

Les processus de dégradation de la matière organique dans un sédiment sableux habité par des bactéries et divers animaux mésopsammiques

ont été étudiés dans un système clos contenant 500 l d'eau de mer. Une circulation de l'eau à travers l'épaisseur du sédiment permet le maintien de conditions aérobies. La charge organique est apportée sous la forme d'un hydrolysate de caséine (casamino acide DIFCO) au taux moyen de 3 doses de 2g par semaine. L'expérience poursuivie pendant plus de seize mois a montré qu'après une période de stabilisation, les populations bactériennes et animales retrouvent des densités assez proches de celles du milieu naturel correspondant, avec des variations plus ou moins grandes en ce qui concerne la composition qualitative et la diversité spécifique. L'apport total de matière organique pour une durée de un an représente 0,33 g d'azote par kg de sable en poids sec (61 g de N/m²/an), 1,11 g de Carbone par kg de sable en poids sec (205 g de C/m²/an), enfin 0,02 g de phosphore par kg de sable en poids sec (6,5 g de P/m²/an). La répartition de la microflore et de la méiofaune selon le gradient vertical semble montrer que le taux d'apport de matière organique est inférieur aux capacités maximales de dégradation (BOUCHER et CHAMROUX, sous presse). La poursuite de ce programme comprend d'une part une recherche systématique de la charge maximale compatible avec une dégradation totale de la matière organique, et d'autre part une extrapolation à un volume cinq fois plus grand.

Sur un plan logistique, la création de bassins expérimentaux à ciel ouvert a été entreprise dans les anciennes salines de l'île des Embiez, sur les côtes de Provence. Deux bassins ont été aménagés au cours de l'année 1975, mais n'ont pu jusqu'à présent être utilisés pour les expériences prévues: une difficulté imprévue liée à l'existence de très fortes teneurs en sel dans le sédiment de la lagune est apparue lors de la première mise en eau, l'eau pompée dans les bassins atteignant rapidement des salinités trop élevées par libération progressive du sel déposé dans les couches de sédiment sous-jacentes. D'autres bassins disposés dans une autre partie de la saline moins exposée à ce phénomène sont en cours de réalisation et devraient être mis en service dans quelques mois.

Les phénomènes d'eutrophisation naturelle ont été étudiés dans un milieu lagunaire très particulier, les réservoirs à poissons du bassin d'Arcachon. Dans ces lagunes mixohalines, l'apport de détritus d'origine végétale constitue la ressource trophique principale. On a pu mettre en évidence une compétition trophique entre les deux constituants majeurs de ces réservoirs, la méiofaune benthique d'une part, et les poissons mugilidés d'autre part, qui se nourrissent tous deux de ces détritus. La méiofaune atteint au début de l'été des densités numériques très élevées auxquelles correspondent des biomasses très fortes. La méiofaune joue un rôle important dans la respiration de l'ensemble de l'écosystème à cette période. Les besoins respiratoires de l'ensemble de la communauté varient de 29,3 à 107,9 ml O₂/m²/h, et sont liés à l'accroissement de la température. A elle seule, la méiofaune représente entre 9 et 58,4% de ce total, alors qu'elle représente seulement 4 à 14% du total dans le bassin d'Arcachon, à l'extérieur des réservoirs. Ces besoins respiratoires très élevés expliquent l'apparition de phénomènes d'eutrophisation catastrophique en période chaude et avec un taux de renouvellement de l'eau faible. Les connaissances acquises sur le fonctionnement "normal" de cet écosystème permettent d'envisager des interventions bénéfiques (LASSERRE et al., sous presse).

La formule adoptée par le CNEOX pour la mise en oeuvre du program-

me ECOTRON (appel d'offres et confrontations régulières des résultats obtenus et des programmes à court terme au niveau des responsables de laboratoires ou d'équipes de recherche) s'est révélée très fructueuse: en 1976, deux actions coordonnées faisant intervenir plusieurs équipes appartenant à plusieurs laboratoires verront le jour, l'une dans les bassins de l'île des Embiez, la seconde dans les réservoirs à poissons du bassin d'Arcachon. L'utilisation des phénomènes d'eutrophisation dans des conditions contrôlées en vue de l'élevage intensif de certaines espèces marines exploitées et de l'épuration des eaux résiduaires de stations d'épuration suppose une profonde réorientation des recherches en écologie marine. Les expériences traditionnelles au niveau du laboratoire doivent être complétées par des essais en vraie grandeur considérant l'ensemble d'un écosystème simplifié. Il y a là une voie de recherche originale, qui recoupe d'ailleurs une tendance actuelle de la biologie marine: les études d'écophysiologie, qui constituent de ce point de vue un préalable essentiel.

BIBLIOGRAPHIE

- BOUCHER, G. et S. CHAMROUX, sous presse. Etude expérimentale des relations trophiques entre Bactéries et méiofaune dans un sable marin. I. Appareillage et résultats préliminaires.
- BULJAN, M., 1961. Quelques résultats sur des expériences de fertilisation de baies marines entreprises en Yougoslavie. Cons. Gén. Pêches Médit., Débats et Doc. Techn., n°6:237p.
- HUGUENIN, J.E., 1975. Development of a marine aquaculture research complex. Aquaculture, 5(2):135-150.
- LASSERRE, P., J. RENAUD-MORNANT et J. CASTEL, sous presse. Metabolic activities of meiofaunal communities in a semi-enclosed lagoon. Possibilities of trophic competition between meiofauna and mugilid fish. 10e Symp. européen Biol. mar., Ostende, 17-23.9.1975.
- LUCAS, A., sous presse. A model of a nursery for rearing bivalve postlarvae. Construction and fittings and preliminary results. 10e Symp. européen Biol. mar., Ostende, 17-23.9.1975.
- ROELS, O.A., R.D. GERARD et A.W.H. BE, 1971. Fertilizing the sea by pumping nutrient-rich deep water to the surface. In Fertility of the sea, J.D. COSTLOW édit., Gordon and Breach Science Publ., vol. 2:401-415.
- RYTHER, J.H., W.M. DUNSTAN, K.R. TENORE et J.E. HUGUENIN, 1972. Controlled eutrophication-Increasing food production from the sea by recycling human wastes. Bio-Science, 22(3):144-152.
- RYTHER, J.H., J.C. GOLDMAN, C.E. GIFFORD, J.E. HUGUENIN, A.S. WING J.P. CLARNER, L.D. WILLIAMS et B.E. LAPOINTE, 1975. Physical models of integrated waste recycling-Marine polyculture systems. Aquaculture, 5(2):163-177.