"Connaître, protéger et conserver la vie marine, trois objectifs du Centre Scientifique de Monaco",

nous déclare José BADIA, Président du Centre Scientifique de Monaco.

Technopolis Méditerranée : Connaître, protéger et conserver la vie marine tels sont décrits, aujourd'hui, les objectifs du Centre Scientifique de Monaco. N'y a-t-il pas là confirmation du lien étroit que Monaco et les Monégasques ont toujours eu avec la mer?

Centre Scientifique de Monaco : Il est de notoriété que les Princes de Monaco ont toujours eu de l'attirance pour les choses de la mer et que, pendant des siècles, les Monégasques, peuple de marins, vécurent de la mer et de la pêche. Mais c'est à Albert 1er, reconnu par l'histoire comme "Prince Savant" que l'on doit la première approche scientifique de la mer. Vivant à une époque où le transformisme était remis à l'honneur, le Prince Albert dont l'esprit philosophique était curieux tenta, à l'exemple de Darwin mais dans un autre monde, celui du silence - cher au Commandant Cousteau -, de la profondeur des océans, de découvrir les mystères de la vie. Ses travaux ont jeté les bases de l'Océanographie.

T.M.: A Monaco, la recherche scientifique est une tradition qui dure depuis plus d'un siècle. Quel rôle le Centre Scientifique de Monaco a-t-il joué dans ce domaine?

C.S.M.: La création du Centre Scientifique de Monaco est le fruit du désir de S.A.S. le Prince Souverain de Monaco de doter la Principauté de moyens propres à mener des recherches océanographiques et de soutenir les actions des organisations nationales et internationales en faveur de la protection et de la conservation de la vie marine.

Par ce geste, Son Altesse Sérénissime le Prince Souverain entendait poursuivre, en quelque sorte, l'oeuvre du Prince Albert 1er. Dans son discours d'ouverture de la Première Conférence Scientifique de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique sur l'Elimination des Déchets Radioactifs, S.A.S. le Prince Rainier a, d'ailleurs, déclaré le 16/11/59 : "Mon Aïeul le Prince Albert 1er a consacré Sa vie en choisissant plus particulièrement le domaine scientifique comme terrain d'entente et de paix internationale... Je voudrais non seulement exalter Son oeuvre scientifique internationale, mais aussi en favoriser la continuation".

T.M.: Quelles sont les grandes dates qui ont marqué l'histoire du C.S.M.?

C.S.M.: On peut distinguer deux périodes:

-Créé en 1960, le C.S.M. eut pour mission l'étude des faibles radioactivités notamment la datation au C14 pour aider la détermination de l'âge des fossiles et des restes organiques en géologie et paléontologie et la mesure de la radioactivité résiduelle après les explosions expérimentales nucléaires, puis la double mission de participer, aux côtés de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (A.I.E.A.), à l'"Action Internationale de l'Atome pour la Paix" et de développer en liaison avec diverses organisations des recherches orientées et la protection de la vie marine. C'est ainsi que fut mis en place, au Musée Océanographique de Monaco, un site de surveillance de la pollution radioactive marine et que le C.S.M. fut chargé de gérer les laboratoires de Météorologie et de séismologie créés par S.A.S. le Prince Albert 1er.

Pendant plus de 25 ans, les travaux et recherches menés par le C.S.M. avec le Laboratoire International de Radioactivité Marine de l'A.I.E.A. furent particulièrement fructueux et concoururent au rayonnement de ces deux entités.

-L'évolution technologique affectant les modes de surveillance de l'environnement motive, en 1990, le transfert de ces activités, devenues techniques administratives, au Service de l'Environnement.

Ces changements furent l'occasion pour le Centre Scientifique de renouer avec la recherche fondamentale et, se réorientant vers l'océanologie, de se consacrer à l'étude des organismes et mécanismes responsables des grands équilibres de la biosphère. Pour cela, de nouveaux laboratoires ont été mis en place au sein du C.S.M.; leur direction scientifique a été confiée au Professeur Jean JAUBERT. Ils constituent l'Observatoire Océanologique Européen, centre de recherche européen reconnu par le Conseil de l'Europe au titre de l'accord Partiel ouvert "EUROPA": Risques majeurs" auquel la Principauté a adhéré en 1989.

L'O.O.E. du C.S.M. occupe actuellement une place dans le domaine de la recherche fondamentale et est largement reconnu par la communauté scientifique internationale.

T.M.: Quelle est l'approche scientifique du C.S.M.?

C.S.M.: Les sciences dites marines distinguent, un peu artificiellement, l'océanographie et la biologie. L'O.O.E. du C.S.M. s'efforce d'intégrer toutes les échelles spatiales (de la molécule à l'écosystème) dans une même structure et permet la liaison entre ces ceux domaines.

Deux axes de recherche ont été suivis principalement depuis trois ans : l'étude du modèle "corail" sous les aspects de faisabilité de transplantation de coraux, du rôle des récifs coralliens dans le cycle global du carbone et de la réponse des coraux aux changements globaux, d'une part; l'étude de la prolifération de la Caulerpa taxifolia en Méditerranée nord-occidentale, d'autre part. Tous deux feront, sans doute, encore l'objet de développement en 1997.

T.M.: Le C.S.M. collabore-t-il avec d'autres entités de recherche?

C.S.M.: Bien sûr, reconnu par la communauté scientifique internationale, le C.S.M. reçoit de nombreux visiteurs scientifiques étrangers et collabore avec quelques uns des meilleurs laboratoires français, belges, italiens, américains, australiens, japonais, israéliens,... Aujourd'hui, l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (A.I.E.A Monaco), le Centre des Faibles Radioactivités (CEA-CNRS), le CEREGE (CNRS-Université Aix-Marseille) et l'ORSTOM ont détaché, chez nous, des scientifiques réputés et/ou des chercheurs doctoraux.

Il m'est agréable de souligner qu'en 1996, le C.S.M. et l'Université de Nice-Sophia Antipolis ont signé une convention de coopération destinée à développer les échanges scientifiques entre l'Université voisine et le C.S.M. dans le domaine des recherches marines fondamentales et celui de leur application à la prévention des risques majeurs et à la régénération des milieux dégradés.

Ainsi, sur la base de programmes coordonnés, élaborés conjointement, des chercheurs, mais aussi des techniciens des deux communautés sont-ils amenés à travailler ensemble et permettre, j'en suis sûr, d'importantes avancées dans un domaine considéré, aujourd'hui, comme essentiel pour le futur de l'humanité.

"Knowledge, Protection and Conservation of Marine Life, the Three Goals of the Scientific Center of Monaco",

adress us José BADIA, President of the Scientific Center of Monaco

Technopolis Méditerranée : Knowledge, Protection and conservation of marine life are the goals today of the Scientific Center of Monaco. Is this the confirmation of the close ties Monaco and the Monégasques have always entertained with the sea?

Scientific Center of Monaco : It is a known fact that Monaco Princes have always been attracted by the sea and that, for centuries, the Monégasques, a population of sailors, have lived from fishing and the sea. But we owe the first scientific approach of the sea to Albert I, recognized in history as the "scholarly Prince". Living in a period in which transformism was back in fashion Prince Albert whose philosophical mind was very curious, tried in the footsteps of Darwin, only in another world, the world of silence so dear to the heart of Commander Cousteau, from the depths of the ocean to discover the mysteries of life. His work layed the foundations of oceanography.

T.M. : In Monaco, scientific research is a tradition which dates back to almost a century. What role has the Scientific Center of Monaco played in this domain?

C.S.M. : The creation of the Scientific Center of Monaco is the fruit of his Royal Majesty the Sovereign Prince of Monaco's desire to endow the Principality with the means to carry out oceanography research and to support the actions of national and international organizations in favor of marine life protection and conservation. By this gesture, his Royal Majesty the Sovereign Prince intended to pursue, in a certain way, Prince Albert I's work. In his speech for the opening of the International Atomic Energy Agency's First Scientific Conference on the theme of Radioactive Waste Elimination, his Royal Majesty Prince Rainier declared on the 16th of November 1959 : "My ancester Prince Albert I dedicated his life in choosing more particularly the scientific domain as a grounds for understanding and international peace... I would like to exalt his international scientific work and favor its continuation".

T.M. : What are the big dates which have marked.C.S.M.'s history?

C.S.M. : We can distinguish two periods :
- Created in 1960, C.S.M.'s mission was to study small radioactivity notably C14 dating to help determine the age of fossils and organic remains in geology and paleontology, and to mesure radioactivity residue after experimental nuclear explosions. Then, the double mission of participating, with the International Atomic Energy Agency, in the "International Atom Action for Peace" and to develop in connection with diverse organizations, orientated research and marine life protection. This is how a supervision site of marine radioactive pollution was installed in the Oceanographical Museum of Monaco, and the C.S.M. was charged with managing the laboratories of meteorology and sismology created by his Royal Highness Prince Albert I.
For more than 25 years, the work and research carried out by the C.S.M. with the International Laboratory of Marine Radioactivity was particularly prosperous and has participated in the radiance of these two entities.
- Technological evolution affecting supervision modes of motive? environment in 1990, the transfer of these activities having become administrative techniques at the service of environment. These changes were the occasion for the Scientific Center to renew with fundamental research and to reorientate itself towards oceanology, to dedicate itself to the study of the organisms and mecanisms responsible for the big balances of the biosphere. To do this, new laboratories have been installed within the C.S.M.; their scientific management headed by Professor Jean JAUBERT. They constitute the European Oceanological Observatory, a European research center acknowledged by the European Council in the title of the open partial "Europa" : Major Risks" agreement to which the Principality subscribed in 1989. C.S.M.'s European Oceanological Observatory currently occupies a place in the domain of fundamental research and is largely acknowledged by the international scientific community.

T.M. : What is the C.S.M.'s scientific approach?

C.S.M. : Marine sciences distinguish a little artificially, oceanography and biology C.S.M.'s E.O.O. tries to integrate all levels of space (from the molecule to the ecosystem) in the same structure and allows for the connection between these two domains.
Two research axes have been mainly pursued since three years : study of the "coral" model in the aspects concerning feasability of coral transplantation, the role of coral reefs in the global carbon cycle and coral's answer to global changes, on one half, the study of Caulerpa taxifolia proliferation in the north-eastern Mediterranean on the other half. Both will undoubtably still be the object of study in 1997.

T.M. : Does the C.S.M. collaborate with other research entities?

C.S.M. : Of course, acknowledged by the international scientific community, the C.S.M. receives numerous foreign scientific visitors and collaborates with a few of the best French, Belgium, Italian, American, Australian, Japanese, Israelian laboratories,... Today, the International Atomic Energy Agency (Monaco), the Low Radioactivity Center (CEA-CNRS), the CEREGE (CNRS-Aix-Marseille University) and ORSTOM have sent us their reknowned and or doctorate researchers.
It is a pleasure for me to highlight that in 1996, the C.S.M. and the University of Nice-Sophia Antipolis signed a Cooperation convention aimed at developing scientific exchanges between the neighbouring university and the C.S.M. in the field of fundamental marine research and their implication in major risk prevention and regeneration of degraded environments.
In this way, on the basis of coordinated programmes, elaborated in conjunction, researchers and technicians of the two communities are called to work together and to allow, I am sure, for important progress in a domain considered today as essential for the futur of humanity.

Photo OCE/Bérard

Salle de culture. S. A. S. le Prince Rainier III visite l'une des salles climatiques installées dans les laboratoires où sont cultivés des organismes marins, en particulier des coraux constructeurs de récifs. Ces organismes extrêmement fragiles et exigeants sont multipliés par bouturage. Ils se développent dans l'eau parfaitement pure de ces bacs de culture fonctionnant en circuit semi-ouvert et équipés d'un procédé original de traitement de l'eau mis au point par le professeur Jean Jaubert. Animaux de laboratoire d'un genre nouveau, les coraux de culture sont des modèles biologiques très bien adaptés à l'étude des mécanismes complexes qui sont à la base des interactions photosynthèse-calcification, impliquées dans le maintien des grands équilibres de la biosphère.

Le Centre Scientifique de Monaco

par S. E. Monsieur César C. Solamito, Président du Comité de Perfectionnement,
Le Professeur Jean M. Jaubert, Directeur Scientifique

A Monaco, la recherche scientifique est une tradition qui dure depuis plus d'un siècle. L'œuvre commencée par les campagnes océanographiques du Prince Albert Ier est poursuivie par l'Institut océanographique et son Musée ainsi que par le Centre Scientifique de Monaco. Fondé le 23 mai 1960 par S.A.S. le Prince Rainier III, le Centre Scientifique a mis ses laboratoires au service d'un grand dessein : mieux comprendre les mécanismes qui contrôlent les grands équilibres de la biosphère pour mieux évaluer les risques et réhabiliter les écosystèmes dégradés.

La création du Centre Scientifique de Monaco fut motivée par le désir de S.A.S. Rainier III, Prince Souverain de Monaco, de doter la Principauté des moyens de mener des recherches océanographiques et de soutenir l'action des organisations gouvernementales et internationales chargées de protéger et de conserver la vie marine.

Prenant la parole le 16 novembre 1959 lors de l'ouverture de la Première Conférence Scientifique de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique sur l'Élimination des Déchets Radioactifs, S.A.S. le Prince Rainier III soulignait le fait que cette conférence continuait en quelque sorte l'œuvre de paix et d'entente entre les peuples à laquelle Son Aïeul, le Prince Albert Ier, avait "*consacré sa vie en choisissant plus particulièrement le domaine scientifique comme terrain d'entente et de paix internationale*". Poursuivant Son exposé, S.A.S. Le Prince Rainier III annonçait la mise en place de nouveaux laboratoires et déclarait : "*Ainsi, après la fin de cette conférence, la Principauté pourra continuer d'apporter à l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique son concours dans la poursuite de son objectif essentiel, qui, aux termes même de son statut, est de hâter et d'accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité du monde entier*".

Créé dans ce contexte, le Centre Scientifique de Monaco (CSM) fut chargé de participer à "*l'Action Internationale de l'Atome pour la Paix*" et de développer, en liaison avec les organisations gouvernementales et internationales, des recherches finalisées ayant pour objectifs la protection de l'environnement et la conservation de la vie marine.

Pour remplir cette double mission, le Centre Scientifique de Monaco mit en place un laboratoire de surveillance de la pollution -dirigé par des chercheurs détachés par le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA)- et prit en charge les laboratoires des services de météorologie et de séismologie créés par S.A.S. le Prince Albert Ier. Hébergées par le Musée océanographique de Monaco, ces trois entités constituèrent les "*Laboratoires Associés*" de l'Institut Océanographique.

Au mois de mars 1961, le Laboratoire International de Radioactivité Marine fut créé dans le cadre d'un Accord tripartite entre le Centre Scientifique de Monaco, l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) et la Fondation Albert Ier. Installé dans des locaux spécialement aménagés du Musée océanographique, il fut d'abord chargé d'étudier les pollutions radioactives marines et de mettre au point des méthodes permettant de les prévenir et de les combattre.

De 1961 à 1989, le Centre Scientifique de Monaco et le Laboratoire International de Radioactivité Marine de l'AIEA menèrent des recherches dont la renommée contribua à renforcer le rayonnement de la Fondation qui les hébergeait et les aidait.

Le Laboratoire International de Radioactivité Marine eut un développement rapide. En 1989, il fut transféré dans des locaux plus vastes et mieux agencés, situés dans le quartier de Fontvieille, mis à la disposition de l'AIEA par le Gouvernement Princier.

En 1990, les laboratoires de Surveillance de la Pollution, de Météorologie et de Séismologie du Centre Scientifique de Monaco furent pris en charge par le Service de l'Environnement du Gouvernement Princier. Ce transfert fut motivé par le haut degré de standardisation atteint par les techniques de surveillance de l'environnement. En particulier, le contrôle de la pollution avait quitté le domaine de la Recherche pour entrer dans celui des techniques administratives attachées à la vérification des normes de qualité applicables en matière d'environnement.

Photo OCE/Jaubert

Installation de microscopie confocale. En associant la précision des faisceaux lasers et la puissance de calcul des ordinateurs, le microscope confocal est devenu un outil indispensable à la conduite de recherches de pointe en biologie cellulaire et moléculaire. Il permet de réaliser de véritables tomographies optiques sur du matériel vivant ou fixé. Il permet aussi de suivre, en temps réel, à l'intérieur des cellules et des tissus, les mouvements de certaines molécules, ions et particules marqués par des sondes fluorescentes. Cette installation comprend un microscope droit et un microscope inversé. C'est l'une des plus modernes et performantes d'Europe.

Photo OOE/Jaubert

Utilisation de radio-traceurs. Les mécanismes de transport de certaines substances, préalablement marquées par incorporation d'isotopes 14 du carbone et 45 du calcium, sont étudiés dans ce laboratoire.

Simultanément, le CSM fut restructuré et ses liens avec les grands programmes internationaux mis en œuvre sous l'égide de l'UNESCO[1], de la COI[1], de la FAO[1], du CGPM[1], de la CIESM[1] ... furent renforcés. Orientées vers l'océanologie, ses nouvelles activités furent consacrées à l'étude des principaux organismes et mécanismes marins impliqués dans le maintien des grands équilibres de la biosphère. La même année, la Principauté de Monaco adhéra à l'Accord Partiel Ouvert "Risques Majeurs" du Conseil de l'Europe et mit en place, au sein du CSM, les laboratoires de recherche constituant l'Observatoire Océanologique Européen (OOE). La programmation, le suivi et l'évaluation des activités de ces laboratoires furent confiés à une *Commission Scientifique* nommée par Ordonnance Souveraine du 26 février 1991.

Ainsi transformé le Centre Scientifique de Monaco put reprendre ses activités purement scientifiques et contribuer à la recherche régionale et internationale, dans la voie tracée par S.A.S. le Prince Albert Ier, avec pour objectifs principaux :

- l'étude des mécanismes biogéochimiques impliqués dans la régulation des grands équilibres de la biosphère (recherches relatives aux risques bio-climatiques liés aux rejets massifs de gaz carbonique anthropogénique),
- l'étude de la réponse des écosystèmes côtiers aux changements globaux (recherche des signes précurseurs des perturbations écologiques majeures),
- la mise au point de techniques aquacoles non conventionnelles (recherches liées à la conservation de la biodiversité et à la restauration d'écosystèmes dégradés).

En raison de son expérience et de l'intérêt qu'il portait à ces objectifs, M. Jean Jaubert, Professeur de biologie marine à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, fut invité à élaborer un programme de recherche et à le mettre en œuvre avec le concours de collaborateurs capables d'encadrer et de former des étudiants préparant la thèse de doctorat.

Parallèlement à ces recherches, des travaux menés en collaboration avec le Musée océanographique permirent d'améliorer les qualités esthétiques et pédagogiques des aquariums tout en allégeant les contraintes de fonctionnement (applications du procédé Jaubert/Microcean).

Aujourd'hui, les laboratoires du Centre Scientifique de Monaco (OOE) comptent une quinzaine de chercheurs et de techniciens (y compris les doctorants et les associés) répartis dans des équipes dont les activités sont étroitement coordonnées et parfaitement complémentaires.

Calcification, gaz carbonique et changements globaux

La calcification marine fait partie d'une chaîne de mécanismes qui régulent la concentration du CO_2 atmosphérique (Berner, 1993). Cette chaîne forme un cycle qui comporte trois grandes étapes : (a) l'altération subaérienne des roches silico-calcaires (le gaz carbonique contenu dans les gouttes de pluie attaque ces roches) ; (b) le transfert (par les cours d'eau) dans les mers et les océans des ions carbonate et calcium issus de cette altération ; et (c) la précipitation de ces ions par les algues calcaires et les coraux qui les utilisent pour construire leurs squelettes.

L'étude de la calcification constitue donc un excellent moyen de caractériser les contraintes environnementales imposées par le gaz carbonique, principal gaz à effet de serre, dont la concentration ne cesse d'augmenter dans l'atmosphère (accroissement d'environ 30 % depuis de le début de l'ère industrielle consécutivement à l'emploi massif de combustibles fossiles) et qui est fortement soupçonné d'être la cause primaire du réchauffement généralisé de la planète.

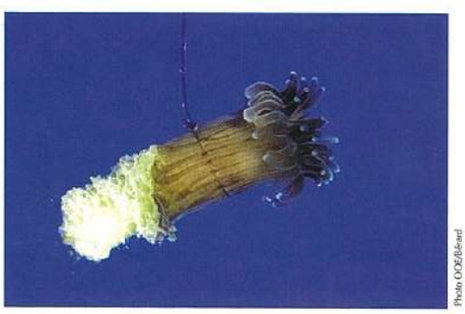

Photo OOE/Bérard

Production de «micro-coraux». La production de «micro-coraux» libres de toute attache permet de disposer de modèles biologiques nouveaux, façonnés pour répondre au mieux aux exigences des protocoles expérimentaux de la recherche moderne. Ici, un polype appartenant à une colonie de l'espèce Galaxea fascicularis vient d'être excisé. La partie inférieure du squelette a été mise à nu au cours de l'opération (partie de couleur blanche). Il sera cultivé en pleine eau, suspendu par un fil de Nylon et, après cicatrisation, donnera naissance à un «micro-corail».

Au Centre Scientifique de Monaco, la calcification est étudiée de l'échelle cellulaire et moléculaire (mécanismes de transport du carbone et du calcium) à celle de l'écosystème (flux de matières et d'énergie). Certains travaux se déroulent sur le terrain. D'autres sont conduits au laboratoire, grâce à des modèles originaux : «micro-coraux» et «mésocosmes coralliens». Tous ont donné lieu à de nombreuses publications parues dans les meilleurs journaux internationaux.

Photo OOE/Bérard

Production de «micro-coraux». Quelques jours plus tard, les tissus ont cicatrisé et de nouveaux polypes ont commencé à bourgeonner. A ce stade, le «micro-corail» est prêt pour l'expérimentation au laboratoire.

Il est important de souligner que les contraintes globales n'agissent jamais de façon isolée. Elles ne font qu'amplifier l'action des contraintes locales. Il ne faut pas oublier que l'homme a toujours aménagé, et donc modifié, son environnement immédiat (culture, élevage, déforestation, construction de voies de communications, de ports etc.).

Photo OOE/Bérard

Production de «micro-coraux». D'autres types de «micro-coraux» sont obtenus à partir de fragments cultivés sur des grilles en matière plastique. Libres de toute attache, leurs squelettes ne peuvent incorporer que des substances capables de traverser les tissus qui les enveloppent. Ils sont surtout utilisés pour des expériences qui font appel à des traceurs radioactifs.

Depuis un siècle (début de l'ère industrielle), les modifications environnementales locales ont connu une accélération très importante engendrée par les développements technologiques et l'explosion démographique. Les activités humaines n'épargnent ni les êtres vivants ni le sol dont les propriétés sont souvent modifiées (par exemple la fertilité et la capacité à retenir l'eau de pluie). Leurs conséquences sont parfois catastrophiques et irréversibles. Ainsi, par exemple, la déforestation aboutit fréquemment à la disparition de la terre arable (emportée par l'érosion) ou à sa stérilisation (par des processus géochimiques comme par exemple la formation de latérites). Lorsque des bassins versants sont touchés par ce processus de désertification, on assiste généralement à une dérégulation du régime des cours d'eau qui connaissent alors des crues dévastatrices. Dans d'autres cas les altérations de l'environnement favorisent le développement d'espèces opportunistes. C'est par exemple le cas de certaines plantes qui prolifèrent sur le bord des routes ou sur les berges aménagées de certains cours d'eau. Les lacs et les rivières sont de plus en plus souvent contaminés par des déchets agricoles industriels et urbains (notamment des nitrates et des phosphates) qui provoquent des déséquilibres caractérisés par des foisonnements d'algues. Dans les cas extrêmes, ce phénomène aboutit à l'asphyxie et à l'effondrement de l'écosystème qui ne parvient plus à «digérer» l'excès des déchets organiques. En mer, le principal danger vient des micro-algues vénéneuses. Dans certaines conditions, celles-ci se mettent à proliférer, tuant des coquillages, des crustacés et des poissons ou les rendant toxiques et donc impropres à la consommation. Leur nocivité résulte de leur aptitude à fabriquer des toxines stables qui s'accumulent dans la chaîne alimentaire. Heureusement, les macro-algues n'ont pas cette faculté et la fameuse Caulerpa taxifolia n'échappe pas à cette règle. Cependant, toxiques ou pas, les proliférations d'algues ont une valeur de signal. L'augmentation de leur fréquence et de leur intensité, dans les biotopes côtiers, révèle l'instabilité croissante de milieux qui subissent des contraintes globales (réchauffement) et locales (pollution) de plus en plus fortes.

Photo G. Giaccone/Université de Catane

Pelouse mixte à Caulerpa prolifera (pseudo-feuilles rubanées) et Caulerpa racemosa (pseudo-feuilles en grappes) dans la baie d'Augusta en Sicile.

Changements écologiques en Méditerranée

Au cours de son histoire récente, la Méditerranée a été soumise à des interactions complexes entre facteurs climatiques (réchauffement) et anthropiques (pollution) qui ont entraîné des modifications de sa faune et de sa flore. Le percement du canal de Suez a accéléré cette évolution en déclenchant un gigantesque échange d'espèces avec la mer Rouge (Por, 1978).

Le développement récent d'espèces pan-tropicales en Méditerranée occidentale marque peut être un tournant dans cette évolution. Après s'être implantée en Sicile (Alongi et al., 1993), l'algue verte *Caulerpa racemosa* est arrivée dans la région de Livourne, Italie (Piazzi et al., 1994). En moins de deux ans, elle a colonisé près de 2000 hectares, dont 200 sont recouverts par une végétation dense (Piazzi et al., 1996). Un peu plus ancienne, et pour le moment plus spectaculaire, l'expansion de *Caulerpa taxifolia* a largement défrayé la chronique. Selon une idée largement répandue par les médias (Byrka, 1992 ; des Naurier, 1992 ; Ody, 1992), tous les spécimens méditerranéens seraient issus d'une souche mutante (ou exceptionnellement robuste), échappée d'un aquarium (Meinesz et Hesse, 1991). Ils auraient la capacité de se développer dans tous les biotopes côtiers et d'éliminer toutes les autres espèces (Meinesz et al., 1994).

Heureusement, le bilan des résultats acquis au terme de plusieurs années de recherches auxquelles le Centre Scientifique de Monaco a largement contribué, permet de brosser un tableau beaucoup plus nuancé et surtout moins pessimiste.

L'éventualité d'une introduction accidentelle reste d'actualité, même si les plus grandes incertitudes continuent de régner quant à l'année, au lieu (Monaco ou Roquebrune-Cap-Martin) et aux modalités d'implantation des premiers spécimens. Ceux qui défendent cette hypothèse prétendent que *C. taxifolia* a été rejetée en mer, à Monaco, et que toutes les populations éloignées de ce site ont été fondées par des boutures transportées par des ancres de navire de plaisance et les filets de pêcheurs (Meinesz et Boudouresque, 1996). Néanmoins, ce scénario (qui a le mérite de la simplicité) présente d'importantes lacunes. Il paraît notamment bien improbable (sinon impossible) que des navires aient pu disséminer des boutures dans des endroits très éloignées de la Côte d'Azur et très isolées (comme la Sicile et les îles de la côte est de l'Adriatique) sans en déposer dans des régions intermédiaires et beaucoup plus fréquentées comme la Corse et la Sardaigne.

En fait, la grande plasticité morphologique de certaines souches de *C. taxifolia* (Chisholm et al., 1995a) permet de penser que cette espèce était présente en Méditerranée orientale, il y a plus d'un demi-siècle, mêlée aux autres *Caulerpa* décrits par Rayss (1941) sur la Côte du Levant. Dans ce cas, comme *C. racemosa, C. taxifolia* aurait pu migrer depuis l'extrême sud-est de la Méditerranée, entraînée par les courants côtiers. Cependant, comme la précédente, cette hypothèse n'est pas dénuée de faiblesses. Contrairement à *C. racemosa, C. taxifolia* est aujourd'hui introuvable sur la Côte du Levant et sa présence n'a jamais été signalée en Turquie et en Grèce. Toutefois, la portée de ces objections est atténuée par le fait que l'histoire des peuplements de Caulerpa de Méditerranée comporte bien d'autres phénomènes étranges et inexpliqués. Au début du siècle, l'expansion de Caulerpa prolifera avait suscité l'inquiétude de l'algologue niçois Ollivier (1929) qui écrivait :*"L'accumulation de matières organiques en certains endroits, par les égouts ... paraît avoir une influence considérable sur la flore et j'y vois la principale cause de l'envahissement croissant du Caulerpa au détriment de la plupart des autres algues ..."*. Ce qui n'avait pas empêché cette algue de régresser, à une époque indéterminée et pour des raisons qui restent mystérieuses, et de disparaître de presque tous les sites où elle avait été signalée (Meinesz, 1972). Inversement, on n'a jamais signalé, en Méditerranée orientale où *C. racemosa* existe depuis plus de 40 ans, de «bloom» comparable à celui qui s'est produit récemment en Italie (Piazzi et al., 1996).

Force est de constater que, pour des raisons qui n'ont pas encore été totalement élucidées, *C. taxifolia et C. racemosa* trouvent, le long des côtes nord de la Méditerranée occidentale, des sites et des conditions exceptionnellement favorables à leur développement. Des analyses de sédiments et des expériences au laboratoire montrent clairement que la prolifération de *C. taxifolia* est liée à la présence de polluants organiques et inorganiques (Chisholm et al., 1995b ; Chisholm et al., sous presse). Piégés dans le substrat (qui a généralement été contaminé avant la mise en place des stations d'épuration), ces polluants sont absorbés par les rhizoïdes (pseudo-racines) de cette algue (Chisholm et al., 1996). Les autres *Caulerpa*, et notamment *C. racemosa*, semblent avoir des propriétés similaires. En dégageant de grandes quantités d'oxygène et en absorbant certains polluants, ces algues semblent capables de faciliter la régénération des sédiments pollués. En outre, le «turn over» rapide de leur biomasse permet de penser que des quantités non négligeables de matière organique sont injectées dans le réseau trophique (chaîne alimentaire) par la voie des boucles microbiennes. Ces résultats, qui devront être confirmés, laissent penser que leur impact n'est pas forcément négatif.

Quelques auteurs ont suggéré que *C. taxifolia* pouvait dominer et éliminer la plupart des autres végétaux marins. C'est parfois vrai pour les algues (Verlaque et Fritayre, 1994). Cependant, comme l'avait déjà autrefois observé Ollivier (1929) à propos de C. prolifera, cette dominance ne semble s'exercer que là où des facteurs liés à la pollution (richesse excessive en nutriments de l'eau, des roches ou des sédiments), favorisent son développement. A propos des Posidonies, on a beaucoup parlé de risques (de Villèle et Verlaque, 1995). Cependant, la situation est loin d'être conforme aux prédictions pessimistes de certains scientifiques. Si, comme on l'a souvent dit et écrit (e. g. Byrka, 1992 ; Ody, 1992), les Posidonies étaient systématiquement "étouffées" et remplacées par *C. taxifolia*, ce sont des centaines d'hectares d'herbiers qui auraient dû disparaître (au moins dans certains sites) au cours des 5 ou 6 dernières années. Or, même dans les conditions les plus défavorables, les herbiers de Posidonies n'ont pas subi de dommages considérables. L'exemple de Cap-Martin (Alpes Maritimes) est, à cet égard, tout à fait démonstratif. En 1990, dans cette zone longtemps exposée à la pollution (la station d'épuration de la ville de Menton n'a été inaugurée qu'en juillet 1995), les herbiers de Posidonies étaient déjà en contact avec une importante (environ 2 hectares) population de *C. taxifolia* (Meinesz et Hesse, 1991; Meinesz et al.,

Photo OOE/Aubert

Exemple de plasticité morphologique chez C. taxifolia. Cet écomorphe (forme de croissance) «mexicana» de C. taxifolia a été récolté en Sicile (site de Torre Faro) en février 1995. Sa forme (pinnules larges et courts) et sa couleur (vert sombre) sont sensiblement différentes de celles des spécimens que l'on trouve habituellement sur la Côte d'Azur. Cependant, comme le montre la photo, ces écomorphes se mettent à bourgeonner des frondes (pseudo-feuilles) de type taxifolia (pinnules effilés de couleur jaune-vert) dès qu'il sont placés dans des conditions favorables. Cette plasticité morphologique, que ne possèdent pas les souches atlantiques, est un argument en faveur de l'origine indopacifique des C. taxifolia de Méditerranée.

Photo OOE/Tamburé

Réhabilitation de milieux dégradés en Polynésie Française. «Pépinière» de jeunes colonies multipliées par bouturage à partir d'échantillons récoltés sur les sites d'expérimentation nucléaire. Encore au stade expérimental, les techniques de culture et de réimplantation permettront bientôt de restaurer des récifs qui ont subi des altérations importantes et qui ont du mal à récupérer de façon naturelle. On peut même envisager de créer des espèces plus résistantes au stress.

1994). Aujourd'hui ces herbiers n'ont toujours pas régressé de façon significative. Cependant, il faut reconnaître qu'on manque encore de recul et qu'il serait imprudent de négliger les risques à long terme.

Quoiqu'il en soit et quelle que soit son origine, *C. taxifolia* ne doit pas être l'arbre qui cache la forêt des risques potentiels associés aux autres espèces tropicales (et il y en a beaucoup) qui commencent à envahir la Méditerranée. En effet, la dispersion de ces espèces est favorisée par une conjonction de facteurs globaux (changements climatiques) et locaux (impact croissant des activités humaines sur les biotopes côtiers). A terme, c'est la composition faunistique et floristique de toute la Méditerranée qui risque d'être plus ou moins profondément modifiée.

Photo CEA/Coat

Réhabilitation de milieux dégradés en Polynésie Française. Ces jeunes colonies transplantées dans le milieu naturel (récif de Mururoa) ont été fixées sur des supports détachables. Leur croissance pourra ainsi être facilement mesurée par une méthode de pesée. Ces travaux sont menés en collaboration avec le Commissariat à l'Énergie Atomique (France).

Conservation d'espèces menacées et restauration d'écosystèmes dégradés

Aujourd'hui, le Centre Scientifique de Monaco est capable de conserver et de reproduire l'immense majorité des espèces de coraux symbiotiques. En revanche, il reste à maîtriser les problèmes liés à la transplantation des jeunes «plants» (notamment fixation et protection). Les chercheurs du Centre Scientifique de Monaco s'emploient à acquérir le savoir faire nécessaire. Des expériences de terrain sont réalisées en mer Rouge, en collaboration avec la Station Marine d'Aqaba et en Polynésie Française en collaboration avec le Commissariat à l'Énergie Atomique.

Rayonnement international

Les laboratoires du Centre Scientifique de Monaco (OOE) occupent une place de premier plan dans le domaine de la recherche fondamentale. Reconnus par la communauté scientifique internationale, ils reçoivent de nombreux visiteurs scientifiques étrangers. Leurs chercheurs font partie d'instances consultatives internationales et sont régulièrement invités à participer à des séminaires de recherche et à des congrès internationaux. Par ailleurs, le Centre Scientifique de Monaco organise régulièrement des réunions scientifiques de haut niveau. L'une des plus importantes fut le 7e Congrès International de Biominéralisation qui tint ses assises au Musée océanographique de Monaco en novembre 1993. Dans plusieurs pays, notamment en France, aux États Unis et au Japon, l'écho de ces activités dépasse largement le cercle des organismes spécialisés.

Photo OOE/Marchioretti

Réhabilitation de milieux dégradés en mer Rouge. Des «micro-coraux» obtenus dans une «pépinière» sont implantés dans le milieu naturel. Les jeunes implants sont suspendus à des cadres fixés sur supports, ce qui permet de faciliter leur transport et d'assurer une bonne protection contre les chocs.

Perspectives

Au cours des années écoulées (1991-1994), des progrès significatifs ont été accomplis dans les principaux domaines étudiés. Le nouveau programme de cinq ans (période 1996-2000) comprend des recherches fondamentales et des recherches appliquées.

En matière d'environnement global, la dégradation généralisée des récifs est devenue un sujet de préoccupation aussi important que la disparition des forêts primaires (Wilkinson, 1993). Dans cette perspective, les causes et les mécanismes du blanchissement des coraux, phénomène récurrent susceptible d'être le signe précurseur d'une perturbation climatique majeure, fera l'objet de recherches intensives. Par ailleurs la mise au point de méthodes de culture sera accélérée afin de pouvoir conserver des espèces menacées et restaurer des récifs dégradés. On s'attachera notamment à sélectionner (ou à créer) des variétés capables de mieux supporter la pollution.

L'étude de la calcification sera poursuivie et affinée. Pour progresser dans la compréhension des nombreux mécanismes déjà identifiés, on aura recours à des techniques de plus en plus sophistiquées (biologie moléculaire, microscopie confocale etc.). On s'attachera à préciser la nature exacte des échanges complexes qui caractérisent les interactions photosynthèse-calcification. Ces travaux seront réalisés en collaboration avec plusieurs équipes extérieures, notamment françaises (Université de Nice) et américaines (Université de Californie à Los Angeles).

A l'échelle de l'organisme et de l'écosystème, les travaux visant à étudier l'impact global de la calcification marine sur le cycle du gaz carbonique seront poursuivis et surtout complétés par des expériences au laboratoire. Des mésocosmes coralliens serviront à modéliser l'action de contraintes environnementales telles que les concentrations de gaz carbonique et les températures élevées sur le métabolisme production et la croissance des récifs coralliens.

Un effort particulier sera fait pour développer les applications environnementales et biomédicales du modèle "micro-corail". A terme, ce travail pourrait être confié à une section "recherche-développement" chargée de mettre au point des techniques de culture de masse et d'autres biotechnologies susceptibles de générer des recettes non négligeables.

L'étude de l'impact écologique du réchauffement global de la Méditerranée, en particulier l'expansion des nombreuses espèces originaires de la mer Rouge (environ 500) qui ont franchi le canal de Suez, pourrait constituer un nouvel axe de recherche. Ces phénomènes risquent, en effet, d'avoir des conséquences économiques et sociales non négligeables, dont l'évaluation justifierait qu'un effort soit fait pour mieux connaître les milieux coralliens du Nord de la mer Rouge qui communiquent désormais presque librement avec la Méditerranée.

Ces perspectives sont nombreuses et attrayantes. Elles exigeront des choix judicieux. Ainsi l'Observatoire Océanologique Européen du Centre Scientifique de Monaco pourra-t-il continuer à maintenir l'esprit d'entreprise et la dynamique qui lui ont permis de se placer parmi les laboratoires de recherche les plus performants dans sa catégorie.

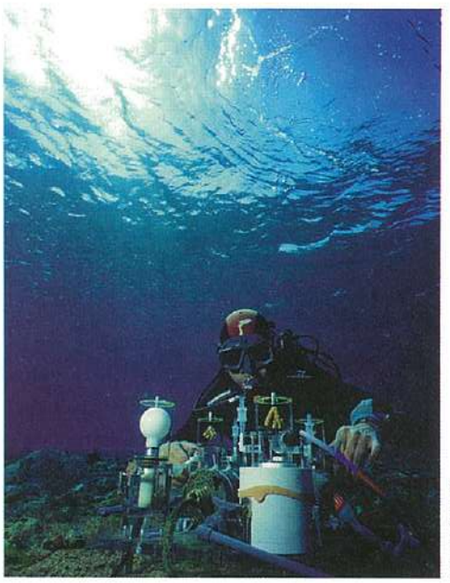

Photo OOE/Marchioretti

Réhabilitation de milieux dégradés en mer Rouge. Le métabolisme des coraux transplantés (production d'oxygène, respiration et calcification) est mesuré in situ à l'aide d'appareils étanches (prototypes conçus et construits à Monaco). Ces recherches sont menées en collaboration avec la Station Marine d'Aqaba (Jordanie).