

Préface

L'ouvrage de Maurice Aubert *Les systèmes d'information des micro-organismes marins : leur rôle dans l'équilibre biologique océanique*, rédigé en 1980, aujourd'hui présenté par Jean-Éric Aubert, a une double signification, historique et scientifique.

Maurice Aubert avait eu l'intuition dès le début des années 1960 de l'existence de « télémediateurs » chimiques issus d'organismes marins, micro-organismes bactériens et certaines algues, qui leur permettaient de communiquer.

La microbiologie était alors en plein essor et c'est dans ce contexte que naquit une grande amitié scientifique et personnelle entre le professeur de microbiologie Jacques Senez¹ et le médecin Maurice Aubert, passionné de biologie marine.

On parle aujourd'hui de *quorum sensing* (observé pour la première fois chez la bactérie *Vibrio fischeri*) pour désigner les systèmes de communication entre bactéries via des signaux moléculaires. Les bactéries qui utilisent ce « langage bactérien » produisent des signaux moléculaires dits « auto-inducteurs » qui fonctionnent un peu comme des hormones car ils sont perçus par les bactéries à des concentrations très faibles.

La notion de petites molécules diffusibles, auto-inducteurs qui reflètent la concentration bactérienne, a été introduite (ou réintroduite pourrait-on dire) par Kaplan et Greenberg en 1985² dans l'étude d'un modèle de régulation d'une lumière « froide », la bioluminescence émise par la bactérie *Vibrio fischeri*. Le phénomène s'explique

1. Auteur du célèbre ouvrage *Microbiologie générale*, paru aux éditions Doin en 1968. J'ai eu la chance de l'avoir comme professeur de microbiologie à l'université Aix-Marseille.

2. Kaplan, H.B., Greenberg, E.P. (1985). Diffusion of autoinducer is involved in regulation of the *Vibrio fischeri* luminescence system. *J. Bacteriol.*, 163, 1210–1214.

par la conversion d'énergie chimique (par oxydation d'une molécule, la luciférine) en énergie lumineuse. 80 % des organismes pélagiques (bactéries, plancton, crustacés, poissons, etc.) sont connus à ce jour pour être bioluminescents, et cela de la surface jusqu'à 4 000 m de profondeur. La bioluminescence joue un rôle direct dans la communication entre bactéries.

La capacité des bactéries à communiquer avec leurs congénères renseigne chaque bactérie sur la densité de la population de sa propre espèce ou d'autres espèces alentour. Les cellules sont perméables à l'auto-inducteur, qui entre dans les cellules par simple diffusion et peut s'accumuler quand la densité cellulaire est élevée. Certaines colonies de la bactérie *Vibrio fischeri* sont libres et se nourrissent en décomposant de la matière organique, mais d'autres bactéries forment des symbioses avec de nombreux organismes marins leur conférant des propriétés de bioluminescence.

Le *quorum sensing* joue un rôle majeur dans les comportements de populations bactériennes, en permettant des comportements coordonnés. D'autres fonctions sont régulées par *quorum sensing* telles que le pouvoir pathogène, la production d'antibiotiques, de biocapteurs, qui par exemple deviendraient luminescents au-delà d'un certain seuil, etc.

Enfin tout ceci n'est pas sans évoquer les alarmes, molécules-signal produites en fortes concentrations par des bactéries et des plantes, sous l'effet de facteurs environnementaux tels que l'absence de certains acides aminés ou en conditions de stress. Antonio Lazcano et ses collaborateurs proposent que ces alarmes, des ribonucléotides ou des dérivés de ribonucléotides, sont des molécules très anciennes, des fossiles moléculaires, déjà présents avant la divergence des trois domaines du vivant en Archaea, Bacteria et Eukarya.

Actuellement se développe la télédétection par satellite des micro-organismes marins, outil devenu indispensable pour prévoir les risques pour la santé humaine associés à ces cibles microscopiques. Les premières études portaient sur des algues nuisibles, mais plus récemment, des méthodes ont été mises au point pour interroger l'océan en vue de déterminer si les bactéries et leurs systèmes de communication étaient détectables à distance.

À mesure que les capteurs par satellite se perfectionnent et que la capacité d'interprétation des données obtenues progresse, nous sommes passés de simples images « fascinantes » de l'espace au développement de modèles à capacité prédictive. La compréhension du rôle des micro-organismes marins a été grandement améliorée, et par conséquent les modèles d'alerte rapide en cas d'épidémies.

L'ouvrage et les travaux de Maurice Aubert sont pionniers et ont ouvert la voie aux découvertes actuelles. Ils guident notre réflexion sur les réponses des micro-organismes aux facteurs environnementaux et sont susceptibles de suggérer de futures orientations en écologie et dans notre compréhension de l'évolution du vivant.

Marie-Christine MAUREL
Professeure et chercheure
Sorbonne Université
Muséum national d'Histoire naturelle
Paris

Avant-propos

Maurice Aubert : la mer, la médecine et l'homme

Réunissant sa passion pour la mer, et sa compétence en médecine, Maurice Aubert a ouvert un nouveau champ de recherche : l'océanographie médicale. Cette discipline scientifique a donné lieu à des applications diverses, par exemple pour lutter contre les pollutions marines, développer la thalassothérapie ou produire des substances pharmacologiques. Elle a aussi donné lieu à des avancées fondamentales en biologie et chimie marines. L'ouvrage *Systèmes d'information des micro-organismes marins* est une synthèse de ces recherches fondamentales. Elle a été rédigée en 1980.

Le texte qui suit présente la genèse et le contenu de l'œuvre scientifique de Maurice Aubert. C'est aussi une « étude de cas » qui montre comment une œuvre scientifique se construit, inspirée par les racines de son auteur, sa personnalité, sa carrière, influencée par le contexte institutionnel et sociétal de son époque, mais aussi fruit du hasard de rencontres inattendues et d'évènements fortuits¹.

Maurice Aubert est né à Sainte-Maxime, sur le golfe de Saint-Tropez, le 12 juillet 1921. Son père, associé d'agent de change lyonnais, issu d'une famille de fourragers de la Drome, s'était installé dans une belle propriété en bord de mer avec sa jeune femme, épousée en secondes noces. Le jeune Maurice, fils unique, y a passé les premières années de sa vie jusqu'à l'âge de raison. Il a gardé toute sa vie un souvenir enchanteur de cette période, se rappelant les virées qu'il effectuait avec les pêcheurs locaux.

1. Ce texte s'appuie, pour une large part, sur des informations fournies par Jacqueline Aubert, sur l'autobiographie de Maurice Aubert, parue sous le titre *La Mer intime* (Éditions du Bergier, 2005), et sur les souvenirs de l'auteur.

La famille, avec la crise de 1929, rejoint la ville de Nice. Maurice y reçoit un enseignement individualisé avec un précepteur, prêtre, avant d'entrer à l'école Masséna. Puis la famille se replie sur Lyon où Maurice termine ses études secondaires au lycée du Parc. Il retourne chaque été à Sainte-Maxime passer ses vacances, naviguer sur son voilier, un monotype de cinq mètres, « un as », courir des régates, jusqu'au Championnat de France de voile qu'il termine dans les premiers.

Il s'engage dans des études de médecine à la faculté de Lyon. Parallèlement, il suit des cours aux Beaux-Arts, avec un maître lyonnais, ami de la famille, Eugène Villon, auprès de qui il acquiert une maîtrise du dessin et de l'aquarelle.

Sous l'occupation, il entre dans la résistance, dans des réseaux associés à des communautés chrétiennes. Il vit alors des moments singuliers. Externe dans les hôpitaux, il doit soigner des blessés allemands sortis des trains qu'il a fait sauter la nuit précédente. Il s'enfuira du service hospitalier après avoir été repéré, injectant un liquide noir dans la plèvre de jeunes hommes recrutés pour le service du travail obligatoire (STO), dans le but de simuler des atteintes pulmonaires. En clandestinité, il échappe à une rafle, au cours de laquelle disparaît son groupe, grâce au bris d'une chaîne de vélo. Il termine la guerre, avec un début de tuberculose, dans un sanatorium à Hauteville en Savoie.

Il reprend ses études de médecine en se spécialisant en neurochirurgie, rejoignant, à l'hôpital Édouard Herriot de Lyon, le service du professeur Wertheimer (qu'il avait incité à fuir, quand il était dans la résistance, ayant vu son nom, d'origine juive, sur une liste de projets d'arrestations). Il passe sa thèse de Docteur en médecine en 1947. Elle porte sur le traitement des névralgies faciales centrales, particulièrement douloureuses, au point d'entraîner des suicides.

Il invente une opération délicate consistant à aller sectionner les nerfs à la racine tout près des pédoncules cérébraux, avec un bistouri conçu par ses soins. Il traite un patient. L'opération réussit. Il présente le résultat au Congrès international de chirurgie à Paris, en 1947, le premier à se tenir après la Seconde Guerre mondiale. Une communication américaine qui précède la sienne présente la même opération, mais sur 18 patients. Depuis l'opération porte le nom de « Walker », l'auteur de la communication en question. La guerre avait empêché les échanges scientifiques et médicaux, et chacun avait avancé de son côté. Mon père m'a souvent cité cet exemple pour relativiser l'accès à la gloire ou à la célébrité. Ma mère ajoutait que c'était une illustration du caractère universel de la recherche, les progrès étant rarement le fait d'une seule personne.

Mes parents se sont mariés en 1947. Ma mère née Jacqueline Lapouge, fille d'un médecin niçois, engagée elle-même dans des études de médecine, avait rencontré

mon père au mariage de sa sœur. De ce jour, ils ne sont plus quittés, unis dans leur vie familiale et professionnelle. Deux enfants naîtront : un garçon, l'auteur de ces lignes, devenu économiste, fonctionnaire international, spécialiste des politiques d'innovation, et une fille, architecte, puis investie dans l'humanitaire.

Après un bref passage à Bordeaux dans le service du professeur Portmann, il ouvre un cabinet d'oto-rhino-laryngologie à Nice, et opère comme chirurgien de la tête et du cou. Un de ses premiers patients est un riche Américain, du nom d'Arthur Sulzberger, de la famille propriétaire du *New York Times*. Il souffre de vertiges apparemment incurables. Une opération près des fosses nasales le soulage. En cadeau, plutôt que la belle voiture américaine que lui propose le patient, Maurice Aubert demande que Marion Sulzberger, son frère, « patron » au Bellevue Hospital à New York, l'accueille. Il y passera deux mois comme interne résident, pour se perfectionner en neurochirurgie.

Accompagné de ma mère, ils avaient fait le voyage en bateau, mes parents ayant, toute leur vie, refusé de prendre l'avion. Mon père expliquait que la vitesse des avions était contraire à la physiologie humaine, une façon aussi de justifier un évitement causé par une peur entretenue par le sentiment de ne pas avoir de contrôle sur l'objet en question.

Le couple achète une villa sur le port du Cros-de-Cagnes, petit village de pêcheurs à une dizaine de kilomètres dans l'ouest de Nice, de l'autre côté du fleuve Var. Achevé juste avant-guerre en 1937, occupé par les Italiens puis par les Allemands qui l'ont fortifié avec des blockhaus, le port est mal conçu et se bouche régulièrement, une barrière de galets obstruant l'entrée. Les autorités envisagent de le combler pour en faire un parking. Pour contribuer à la pérennité du site, Maurice Aubert crée la Société nautique du Cros-de-Cagnes, rejoint l'équipage du canot de sauvetage, et s'associe même aux pêcheurs qui barrent avec leurs « pointus » la route du bord de mer, nouvellement construite, pour obtenir le maintien de l'ouvrage. La construction d'épis rocheux à l'entrée du port, déviant les flux de galets, a permis quelques années plus tard d'assurer sa viabilité.

En quête de solutions au service des patients et des handicapés, Maurice Aubert invente un « tympan électronique artificiel », ancêtre de nos sonotones. Il présente cette invention (réalisée avec un ami ingénieur, Eugène Miquelis, parfumeur à Grasse) au Congrès mondial d'oto-rhino-laryngologie qui se tient à Washington en 1957 – la délégation française est présidée par son beau-père, Jean Lapouge. La Bell Corporation, major américaine du téléphone, se montre intéressée par l'invention, mais les projets ne déboucheront pas, entravés par des questions de propriété industrielle, les prises de brevets américains paraissant trop chères à l'époque.

Au cours de ce voyage, il a l'occasion d'assister dans un grand hôpital new-yorkais à une opération de pointe. Accompagné par un collègue canadien, après une nuit un peu trop arrosée, ils arrivent en retard et constatent un ballet d'ambulances devant l'hôpital : une explosion s'était produite dans la salle d'opération où ils auraient dû se trouver. Il y avait plusieurs morts et blessés. Revenant sur cet épisode, il dira : « J'avais eu de la chance, et éprouvé aussi le sentiment qu'on ne pouvait pas gâcher sa vie ; la chance est chauve, on ne la rattrape pas par les cheveux. »

Le cabinet de Nice se développe bien, avec l'appui de ma mère. La clientèle afflue. Il soigne des célébrités qui vivent ou passent sur la Côte d'Azur : Charlie Chaplin, Romy Schneider, la chanteuse d'opéra Mado Robin, l'Abbé Pierre, etc. Mais l'exercice de la médecine le lasse. Il dira : « J'avais l'impression que lorsque les gens étaient vraiment malades, je ne pouvais pas faire grand-chose pour eux ; quant aux autres, la grande majorité, il fallait surtout les écouter, cela valait mieux que beaucoup de traitements. » Il est tenté par un retour à la peinture dans laquelle il se réinvestit beaucoup. Il a aussi le désir de rejoindre son berceau de naissance, le golfe de Saint-Tropez, où il négocie notamment la villa *La Madrague*, en baie des Canebiers, que lui souffle, au dernier moment, Brigitte Bardot.

Cependant, cette perspective de se replier sur ses racines et son talent de peintre ne le satisfait pas. Comme il le dit alors à ma mère : « En peinture, il n'y a pas de critère absolu pour juger d'une œuvre. Je dépendrai toujours du jugement des autres. En science, ce ne sera pas le cas. »

C'est ainsi qu'à l'été 1960, il décide de créer un centre pour promouvoir une discipline nouvelle : l'océanographie médicale. Le projet résulte d'un faisceau de facteurs, tous liés à son activité médicale et à sa connaissance intime de la mer, et notamment :

- du besoin de mieux comprendre les effets bénéfiques de l'eau de mer sur les organismes, et en particulier de ceux qu'il observait pour le traitement des sinusites de ses patients à qui il administrait systématiquement des lavages d'eau de mer ;
- de sollicitations pour analyser les effets des pressions sur les plongeurs en eau profonde, qui lui étaient adressées notamment par le musée océanographique de Monaco, dont le commandant Cousteau venait de prendre la direction ;
- de la renaissance de la thalassothérapie, réclamant des réglementations, sur lesquelles venait le consulter le directeur du Laboratoire municipal d'hygiène de la ville de Nice, le docteur Robini.

De là naît le projet d'un centre qui traiterait des relations entre le milieu marin et la santé de l'homme, tant sur les aspects positifs que négatifs. Le centre serait

installé dans le laboratoire d'hygiène en question, deux pièces lui étant réservées, pour débiter ses activités. La petite équipe de recherche acquiert une identité sous le nom de « Centre d'études et de recherches de biologie et d'océanographie médicale » (CERBOM), une association loi de 1901.

Les premières expériences portent sur les effets antibiotiques de l'eau de mer, avec des protocoles très simples au départ, comme le raconte Jacqueline Aubert. L'eau de mer est mélangée à des doses variables avec de l'eau d'égout. Plus la dose d'eau de mer augmente, plus les bactéries entériques disparaissent. À certaines périodes de l'année, le phénomène apparaît plus fort et plus rapide. Ce sont des périodes où il y a une grande efflorescence d'une espèce de plancton – les diatomées, comme le montrent des observations au microscope. C'est ainsi, dès les premiers mois du CERBOM, que naît l'intuition sur le pouvoir antibiotique du plancton qui est à l'origine des travaux scientifiques présentés dans cet ouvrage.

Très peu de temps après, Maurice Aubert est appelé d'urgence auprès d'une sommité en économie, le professeur André Piatier, l'un des fondateurs de l'INSEE, professeur à l'École pratique des hautes études (ancienne EHESS), grièvement blessé à la frontière italienne par une cale propulsée par la roue d'un bus qui est venue percuter son orbite gauche, le plongeant dans le coma. Il le tire d'affaire d'extrême justesse, après une opération délicate et une convalescence de plusieurs semaines. André Piatier lui viendra en aide pour consolider le CERBOM, en aménager les statuts, et ouvrir des portes dans les milieux parisiens.

Il le met en contact avec son frère Henri, directeur au Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Une rencontre est organisée avec Jacques Labeyrie, chercheur éminent et créatif, qui dirige le laboratoire des faibles radioactivités. Ce dernier propose un petit contrat pour la fourniture régulière de grandes quantités de plancton, chose qu'il n'avait pu obtenir d'autres laboratoires. Le CERBOM va les lui fournir, et asseoir sa crédibilité. La relation avec Jacques Labeyrie se développera ensuite pendant des décennies dans la plus grande des complicités.

Une rencontre a lieu également avec l'Institut national d'hygiène (INH), dirigé par le professeur Bugnard, qui souhaite élargir son champ de recherches aux relations entre la santé et l'environnement, y compris marin. Un contrat est passé pour étudier le pouvoir antibiotique du plancton. La démonstration, faite avec des antibiogrammes sur des cultures planctoniques, est concluante. Les autres travaux du CERBOM répondent à des commandes publiques locales : analyses des eaux de baignade, études d'émissaires pour les égouts en mer, expertises pour des centres de thalassothérapie, etc.

Ces activités « locales » n'ont pas qu'un caractère anecdotique du point de vue de la science, ou lucratif pour le démarrage du centre de recherche. Elles témoignent,

aux yeux de mon père, de la relation étroite que cette discipline nouvelle reliant la mer et la santé doit avoir avec les problématiques concrètes, dans une perspective fondamentalement interdisciplinaire et holistique, intégrant la biologie, l'écologie, l'économique, l'ingénierie, etc., au service des hommes ici et maintenant.

Un logo où s'entremêlent une ancre et un caducée caractérise le CERBOM. Il traduit le lien entre la mer et la médecine qui est au cœur du projet.

Il convient, à ce moment du récit, de donner quelques indications sur le contexte institutionnel de l'océanographie française de l'époque². Au début des années 1960, l'océanographie n'a pas reçu beaucoup d'attention de la part des pouvoirs publics. Le principal organisme, du moins celui qui dispose de plus de moyens, est l'Institut scientifique et technique des pêches maritimes (ISTPM). À côté, un certain nombre de laboratoires poursuivent des recherches sur la vie dans les océans (faune, flore, plancton, etc.), et notamment : un centre à Concarneau qui dépend du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN, le plus ancien laboratoire dans le domaine), un centre à Roscoff qui dépend du CNRS, des centres liés à des universités, à Banyuls et à Villefranche-sur-Mer, qui dépendent de l'université de Paris, et à Marseille (Endoume). Il y a aussi des programmes à l'Institut français du pétrole (IFP), au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), et à la Marine nationale. Et il y a, bien sûr, le Musée océanographique de Monaco, en pointe depuis les explorations pionnières du prince Albert.

Ce n'est que plus tard, vers le milieu des années 1960, que l'on prend conscience de l'importance industrielle, militaire et stratégique de l'océan. À l'initiative du général de Gaulle est créé, en 1967, le Centre national d'exploitation des océans (CNEXO), sur le modèle du CNES pour l'espace. Le CNEXO va s'investir en priorité sur les ressources minières et géologiques, les fondements géophysiques des océans, l'exploration des grands fonds, etc. (toutefois, sans jamais recevoir les moyens dont les autres grands programmes français de l'époque ont pu bénéficier ; il sera, en 1984, fusionné avec l'ISTP pour constituer l'IFREMER).

Aussi y a-t-il, au début des années 1960, un espace pour des recherches sur la mer et la santé, dont l'INH avait pressenti l'intérêt, comme on l'a évoqué. L'idée est donc avancée de créer au sein du CERBOM une unité de recherche de l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM, nouveau nom de l'INH)

2. Lire, à ce propos, un article consacré au CERBOM et à sa production scientifique par Hervé Ferrière dans la revue *Pour Mémoire*, numéro spécial, hiver 2017, revue du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, du Logement et de l'Habitat durable : « Un océan pollué, mais aussi source de santé ? Les singulières thématiques du Centre d'études et de recherches de biologie et d'océanographie médicale dans les années 1960-1970. »

spécialisée sur le milieu marin. La mission d'évaluation est réalisée par le docteur Jean-Pierre Bader, conseiller auprès de la direction de l'INSERM. Le CERBOM, pour la partie concernant la recherche fondamentale, devient l'unité 40 de l'INSERM. Ma mère devient attachée de recherche.

Sur la suggestion de Jean-Pierre Bader, le directeur du CERBOM est inclus dans la délégation française qui doit participer à une « conférence scientifique » pour les pays en développement, organisée par les Nations unies à Genève, en 1963. Il doit présenter une communication sur la « possibilité d'application diététique de la biomasse planctonique ». La délégation française est dirigée par Henri Laugier, qui fut le premier directeur du CNRS, avant de devenir (entre autres) secrétaire général adjoint de l'ONU. Il fut également chef de cabinet du ministre de l'Éducation nationale à la fin du Front populaire. Henri Laugier, avec qui la sympathie sera immédiate et la relation très durable, passe commande d'un livre à Maurice Aubert, *Cultiver l'océan*, qui sera publié l'année suivante aux PUF.

Dans la délégation française se trouve aussi Jacques Senez, médecin et professeur à la faculté des sciences de Marseille, spécialiste des bactéries extraites du pétrole sur lesquelles on fonde beaucoup d'espoir pour nourrir les populations. Une amitié profonde, une relation filiale à certains égards, se développe entre Jacques Senez et Maurice Aubert.

Dans le même temps, la ville de Nice, avec à sa tête son maire Jean Médecin, décide de construire pour le CERBOM un bâtiment sur un terrain situé sur le cap de Nice. Long d'une trentaine de mètres, sur deux niveaux, et plus de 300 m², il accueille des laboratoires, des bureaux, une salle de conférence, etc. Achievé en 1964, il sera augmenté d'un troisième niveau quelques années plus tard. La partie la plus innovante, et importante d'un point de vue scientifique, est constituée par une salle de culture de plancton. Elle comprend une chaîne biologique conduisant des phytoplanctons et zooplanctons jusqu'aux poissons, qui permet de mesurer les processus de concentration des substances (toxiques notamment) dans le milieu marin. Ainsi est reconstituée la chaîne qui va du plancton à l'homme.

C'est une époque où l'on commence à se préoccuper des pollutions aussi bien dans la population que dans le monde politique. L'échouage en baie de Cannes d'un paquebot de croisière, le *Venezuela*, qui a heurté un récif au large des îles de Lérins, va cristalliser les peurs sur la Côte d'Azur. D'importantes nappes de pétrole s'échappent de son flanc. Le CERBOM intervient avec succès en traitant les nappes avec un mélange de détergent et de sable, qui fait couler la substance noirâtre. Le procédé sera connu sous le nom de PAM6 (produit antimazout 6), car c'était le sixième essai de mélange.

Cette intervention assoit la notoriété du CERBOM. Mais pas seulement, il en tire aussi des enseignements scientifiques d'importance, car le suivi des résidus dans le milieu marin montre une capacité de résilience, et même d'auto-épuration, face aux pollutions chimiques. À l'instar de celle observée face aux pollutions bactériennes avec les travaux sur les émissaires et les égouts. Une théorie de l'équilibre général du milieu marin est en train de s'ébaucher.

Une grande partie des recherches du CERBOM, de son directeur et de ses collaborateurs, est alors publiée dans les *Cahiers du C.E.R.B.O.M.*, une revue fondée dès sa création. Des colloques internationaux sont également organisés.

Devant les responsabilités croissantes qu'implique le développement du CERBOM, la question se pose pour son directeur d'un poste à plein temps, comme maître de recherche. Cela veut dire abandonner complètement l'activité de médecin et chirurgien poursuivie à mi-temps, et, en termes financiers, toucher des revenus sensiblement moindres. Mais le jeu en vaut la chandelle. Un dossier est déposé, au printemps 1965, auprès de la commission spécialisée de l'INSERM. Celle-ci refuse l'intégration, à l'instigation d'un de ses membres, le professeur André Lwoff, éminent chercheur en biologie moléculaire, considérant que les travaux scientifiques sont insuffisants pour prétendre au poste de maître de recherche.

Sur l'insistance de Jacques Senez, André Lwoff accepte de recevoir l'impétrant, bien décidé à le convaincre. La discussion, rapportée par ce dernier, prend un tour singulier : « Qu'avez-vous découvert, M. Aubert ? » « Le pouvoir antibiotique du plancton ! Si vous estimez que mes travaux sont insuffisants, j'arrête une carrière de chercheur immédiatement. Mais ne tranchez pas sur la destinée d'un individu sans vous être pleinement informé de ses capacités ! » André Lwoff reviendra sur sa décision. Quelques semaines plus tard, il se verra décerner le prix Nobel de médecine avec Jacques Monod et François Jacob pour leurs recherches sur l'ARN. Il sera par la suite un supporteur indéfectible du CERBOM et assurera la présidence de son conseil scientifique à la fin des années 1960.

Devenant fonctionnaire de la recherche, et quittant son activité de médecine libérale, mon père réalise sa dernière opération chirurgicale d'envergure sur une patiente de mon grand-père, présent à cette occasion. Ma mère est aussi présente et l'assiste, entourée par de nombreuses infirmières et par l'anesthésiste. Il me propose d'assister à l'intervention, argumentant que c'est sa dernière, et qu'à 16 ans, il est temps que je connaisse le métier qu'il a exercé depuis une vingtaine d'années. L'opération est complexe. Il s'agit d'enlever une tumeur de la gorge qui a pris les cordes vocales et une partie du larynx. Elle dure plus de quatre heures. Je suis pris de nausée au début, après avoir vu le bistouri fendre les chairs entre deux champs.

Avec le recul, je compris, à travers cette expérience, ce mélange de sens clinique, d'esprit pratique et d'attention pour l'humain qui a imprégné les travaux de mon père.

Il avait aussi une capacité à faire confiance à ses intuitions avec une grande sûreté et une économie de moyens, parfois étonnante. Ainsi, j'ai souvenir d'une expérience vécue lorsque j'avais 12 ans. Mon père avait une étude à faire sur la courantométrie du golfe d'Ajaccio, où nous n'avions pu nous rendre en bateau en raison d'un violent mistral. Avisant vers la pointe des Sanguinaires une petite crique d'une trentaine de mètres de long et d'une dizaine de mètres de large, orientée et ouverte sud-ouest comme le golfe, il nous fit faire des observations avec des petits bois flottants. Il en tira des conclusions qui se révélèrent justes, après des missions approfondies réalisées par la suite sur l'ensemble du golfe. Une vision fractale de celui-ci lui avait suffi.

Pour compléter leurs connaissances en biologie marine auprès des meilleurs spécialistes mondiaux, mes parents partent deux mois aux États-Unis, fin 1965. Ils séjournent sur la côte Est, notamment au centre de recherche de Woods Hole, principal institut de recherche public américain sur l'océan, à New York auprès des laboratoires experts des cultures planctoniques, et sur la baie de Chesapeake dans les centres associés à la marine américaine.

Au retour, mon père passe une thèse de doctorat ès sciences à la faculté des sciences de Marseille. Le titre en est : « Comportements des bactéries terrigènes en mer – Relations avec le phytoplancton ».

Les relations sont consolidées avec les universitaires qui dominent à l'époque l'océanographie française, et notamment le professeur Pierre Drach – directeur du laboratoire de Banyuls – et le professeur Jean-Marie Pérez – directeur du laboratoire d'Endoume, à Marseille –, animateurs de la Commission nationale qui donnera naissance au CNEXO.

Les *Cahiers du C.E.R.B.O.M.* deviennent la *Revue internationale d'océanographie médicale*, sur l'instigation d'André Lwoff. Un ouvrage, co-écrit avec ma mère, *Océanographie médicale*, publié chez Gautier-Villars en 1969, présente cette nouvelle discipline qu'ils viennent de fonder.

Sur le plan scientifique, des apports importants sont réalisés avec la salle de culture de plancton et la chaîne biologique, notamment pour démontrer les processus de concentration du mercure à l'origine de la maladie de Minamata, du nom d'une baie au Japon polluée par une imprimerie, maladie qui avait tué des centaines de personnes. Par ailleurs, des modèles mathématiques sont construits et systématiquement appliqués

pour prévoir la diffusion des pollutions en mer et définir des ouvrages et émissaires en conséquence.

Cependant, les travaux du CERBOM vont changer de dimension, avec ce que l'on peut considérer comme le grand œuvre de ses équipes : une série d'inventaires de diverses natures sur le milieu marin en Méditerranée et les côtes françaises d'Atlantique, Manche et mer du Nord. Ces travaux seront fondés sur des campagnes océanographiques réalisées sur plus de 25 années, de 1965 à 1990, avec une série de navires mis à disposition du CERBOM par son propriétaire : *Saint Jacques III*, *Saint Maurice IV*, *Noéric I, II et III* (le *Noéric III*, le plus grand, est une goélette de 18,50 mètres)³.

Seront ainsi publiés les ouvrages suivants (avec pour certains d'entre eux plusieurs tomes couvrant la méthodologie, puis les mers Méditerranée, Atlantique, Manche et Mer du Nord) :

- *Inventaire national de la pollution bactérienne des eaux littorales* (1968) ;
- *Étude générale des pollutions chimiques rejetées en mer* (1969) ;
- *Diffusion des polluants en mer* (1975) ;
- *Enquête nationale de l'état sanitaire des zones marines côtières* (1977) ;
- *Métaux lourds en Méditerranée* (1980-1988) ;
- *Études hydrologiques, chimiques et biologiques dans les mers d'Europe* (1989-1990) ;
- *Étude des risques sanitaires liés à la présence du mercure en Méditerranée* (1995).

Ces inventaires ont résulté de commandes publiques, notamment des ministères de l'Environnement et de la Santé pour les enquêtes sanitaires, ainsi que de contrats européens, et ont été menés, pour certains avec le concours de laboratoires étrangers, comme par exemple le Centre commun de recherche (CCR) de la Commission européenne, situé à Ispra, sur le lac Majeur.

Quelques-unes de ces publications ont eu un impact politique. Ce fut le cas des inventaires sur les pollutions bactériennes, qui pointaient des rivages problématiques, et dont les données furent mises en exergue en 1974 par la revue de défense des consommateurs *Que Choisir ?*. Ce qui ne plut pas aux édiles concernés. Simone

3. Voir les descriptions et les photos des navires dans l'ouvrage *Un siècle de navires scientifiques français*, par le contre-amiral Bernard Estival, Éditions du Gerfaut, 2003.

Veil, alors ministre de la Santé, s'appuyant sur des arguments préparés par le directeur du CERBOM, dut tempérer les polémiques.

Plus généralement, les préoccupations sur la pollution et le saccage de la planète prennent alors de plus en plus d'ampleur. Notamment avec des personnalités médiatiques comme Jacques-Yves Cousteau et Alain Bombard. Ils sont réunis, en 1972, avec Maurice Aubert par la Fondation Paul Ricard sur l'île des Embiez, pour lancer un cri : « Demain il sera trop tard ! » Les craintes ne concernent pas à l'époque le changement climatique et ses effets, mais plutôt la destruction et l'épuisement des ressources.

De fait, depuis mon enfance, j'avais entendu mon père s'alarmer à ce sujet et affirmer l'impossibilité d'une croissance économique continue avec, en plus, l'explosion démographique. Aussi la publication, en 1973, du rapport du Club de Rome « Limits to Growth », préparé par les époux Meadows du MIT, le conforta dans ses convictions. Néanmoins, il se refusa, toujours, à adopter des positions écologiques extrêmes, prenant en compte les besoins économiques et sociaux des populations, notamment dans les projets concrets qu'il avait à évaluer.

Le développement de l'œuvre scientifique de Maurice Aubert a été dû, bien sûr, à sa personnalité et son histoire, mais aussi au « climat » dans lequel évoluaient la recherche et l'océanographie françaises à l'époque. Dans un univers institutionnel dynamique et fluide, il y avait une soif de connaissances nouvelles dans une approche fondamentalement interdisciplinaire. Ainsi, un petit groupe de personnes – soutenu par des scientifiques reconnus et des « parrains » respectés – a pu créer une discipline nouvelle aux multiples applications en seulement une dizaine d'années. Il n'est pas sûr qu'une telle percée aurait été aussi facile aujourd'hui, tant ont changé les conditions de la recherche médicale et océanographique, exigeant des moyens considérables, reposant sur des équipes multinationales, et opérant dans des structures institutionnelles complexes.

Les récompenses et distinctions scientifiques sont venues couronner tous ces travaux et succès scientifiques. En 1971, Maurice Aubert devient directeur de recherche de première classe à l'INSERM. Il est fait Chevalier de la Légion d'honneur en 1975. Il reçoit la médaille d'argent de l'Académie nationale de médecine en 1982. Dans l'Ordre du mérite maritime, il est fait Chevalier en 1986, et Officier en 1995. En 1991, la médaille d'or de la recherche scientifique et de l'invention de la ville de Paris lui sera attribuée. À l'étranger, il est fait Chevalier de l'Ordre du mérite de la République italienne. Il reçoit la médaille d'or de la Société italienne de toxicologie en 1970, et la *Targa d'Oro per Ecologia* en 1990 pour ses travaux sur la pollution marine.

La récompense qui le touche, sans doute, le plus est l'attribution, en 1990, du premier « Grand prix international de l'environnement » décerné à l'initiative du Saint-Siège. Il est récompensé pour la dimension scientifique, aux côtés du *National Geographic Magazine* pour les médias, et de l'homme politique italien, A. Fanfani, pour l'action publique⁴. Au cœur des travaux scientifiques ainsi récompensés se trouve la mise en évidence des télémédiateurs du milieu marin qui fait l'objet de cette publication.

Maurice Aubert est membre de diverses commissions scientifiques nationales et internationales. De 1980 à 1993, il a été délégué français auprès de l'organisation internationale RAMOGE, chargée de la protection de la Méditerranée Ouest (RAMOGE pour Saint-Raphaël, Monaco et Gènes, les villes initiatrices de la convention en question).

Il fait partie en 1983 et 1985 des personnalités désignées par le Karolinska Institutet de Stockholm pour faire des propositions de candidatures au prix Nobel de physiologie et de médecine.

Il participe à la rédaction de grands ouvrages comme l'*Encyclopedia Universalis* et l'*Encyclopédie médico-chirurgicale*, ainsi qu'à des rapports du Plan bleu des Nations unies. La *Revue internationale d'océanographie médicale* est diffusée dans 60 pays.

Mais après les honneurs viennent aussi les épreuves. Le gouvernement socialiste arrivé au pouvoir en 1981 prend un décret selon lequel les directeurs de centres de recherches ne peuvent rester plus de douze années à ce poste. En 1985, une responsable venant de Paris est nommée pour chapeauter à la fois le CERBOM, dont le directeur conserve le leadership d'un groupe « Environnement marin et santé publique », et le centre de recherche de Villefranche-sur-Mer. En 1990, Brahim Lahlou, professeur à l'université de Nice, est nommé directeur, tandis que Maurice Aubert assure la présidence du conseil scientifique.

Il faut, par ailleurs, consolider une position universitaire. Il est nommé professeur à l'UER Civilisations de l'université de Nice (1985-1989), puis directeur du Centre

4. Prix « Cantiques des créatures ». Le jury était composé du directeur des sciences écologiques de l'UNESCO, du directeur général des recherches en sciences et développement de la CEE, du président de l'Académie nationale des sciences d'Italie, du président de l'Académie pontificale des sciences, du secrétaire de l'Académie royale des sciences de Suède, et de responsables de divers organismes de conservation de la nature. Le prix couvrait trois sections : la recherche scientifique, la communication et l'information, et l'action politique. Le prix était remis à Assise. Il fut distribué quatre années de suite, avant de disparaître faute de financement.

d'analyse de l'espace marin et littoral au sein de cette entité. Il est membre du Conseil scientifique de l'Université (1987-1989).

Son intérêt pour l'enseignement se manifeste aussi avec la création, en 1985, de l'Université internationale de la mer (UIM), avec le concours du Collège international de Cannes, fondé par Paul Valéry en 1931, pour promouvoir auprès des jeunes étrangers la langue et la culture françaises. Cette entité, installée au sein du CERBOM, donnera lieu à des formations de niveau post baccalauréat. Elle prendra une autre forme à Cagnes-sur-Mer, une dizaine d'années plus tard, comme nous le verrons.

L'investissement dans les sujets civilisationnels, et plus particulièrement dans la civilisation méditerranéenne, débouche sur un colloque organisé en 1995 à la Fondation Singer Polignac : *La Méditerranée, la Mer et les Hommes*, sous les auspices du ministre de l'Environnement de l'époque, Brice Lalonde. Y contribuent des sommités scientifiques, telles que le professeur Auboin, ancien président de l'Académie des sciences, et littéraires, telles que Jacqueline de Romilly, académicienne spécialiste de la Grèce. Le colloque se prolonge par la publication en 1996 d'un ouvrage du même nom qui, sous la plume de Maurice Aubert, présente une vaste fresque à la fois écologique, maritime et humaine de la Méditerranée (Éditions de l'environnement).

Le CERBOM finit par fermer en 1993, après que la municipalité niçoise ait décidé de transformer les locaux en un bâtiment abritant le tribunal administratif. Les archives contenant plus de 12 000 documents (publications reçues de multiples pays, numéros de *Cahiers du C.E.R.B.O.M.* et de la *RIOM*, rapports de missions et de campagnes, cartes, etc.) sont transférées dans un modeste garage du quartier de l'Ariane, loué en toute hâte.

Ainsi se termine l'histoire du CERBOM. Donnant « une nouvelle dimension à l'océanographie », selon les mots du professeur Drach⁵, avec une productivité scientifique exceptionnelle au regard de sa taille (jamais plus d'une quinzaine de chercheurs et techniciens), il a évolué aux côtés d'organismes beaucoup plus importants et beaucoup plus en vue, tels le CNEXO (puis l'IFREMER), ou encore le Musée océanographique de Monaco, tout en étant difficilement classable, opérant sur des thématiques « singulières » à la jonction entre l'océan, la santé et l'homme⁶.

L'épopée va se poursuivre avec l'établissement, en 1996, de l'université internationale de la mer (UIM), à Cagnes-sur-Mer. Elle est installée dans le bâtiment

5. Note manuscrite de Pierre Drach à l'intention du directeur du CERBOM, suite à une visite au début des années 1970.

6. On a même pu le considérer comme un « objet scientifique non identifié » (voir Hervé Ferrière, déjà cité).

renové de la prud'homie des pêcheurs, sur le port du Cros-de-Cagnes, à côté de la maison familiale. L'appui de la municipalité de Cagnes, nouvellement élue, lui donne l'usage gratuit du bâtiment avec des salles de cours et des laboratoires, ainsi qu'une salle de conférence. Les archives du CERBOM y sont rapatriées.

La structure va lancer des formations de divers niveaux, y compris pour des étudiants étrangers accueillis en stage : de niveau master I et II en biologie marine et géographie marine, en coopération avec l'université de Nice-Sophia Antipolis, des formations professionnelles de techniciens d'aquaculture, des formations maritimes de capitaines et matelots pour navires de plaisance et de pêche, et aussi des actions de sensibilisation pour les élèves des écoles. Des programmes de recherche sont lancés avec des financements locaux, nationaux et européens. Des colloques sont organisés sur le thème de la mer et de la santé, ou encore, sur des sujets plus généraux, concernant la science (*Sens et valeur de la recherche scientifique*), tandis que les chercheurs et dirigeants de l'UIM participent à diverses commissions locales (commission Mer de la communauté d'agglomération Nice Côte d'Azur), régionales (pôle Mer de la région PACA), nationales et internationales (voir ci-après). Des coopérations sont développées avec le Musée océanographique de Monaco ; son directeur, le professeur Doumenge, et Maurice Aubert éprouvent une grande estime l'un pour l'autre.

Maurice Aubert s'implique fortement dans les dix premières années de l'UIM, mettant son bateau à disposition de la structure. Il passe, en 2005, la direction opérationnelle à une de ses élèves, Isabelle Mor, tout en conservant la présidence du conseil scientifique.

Le rapport d'activité de 2008⁷, dernière année de son implication, fait état de l'accueil de 243 stagiaires, pour des cours de biologie marine et d'aménagement du littoral et des rivages (une cinquantaine d'étudiants de master) et des formations maritimes (une centaine de professionnels). Pour ce qui est de la recherche, le rapport d'activité fait état : d'un contrat européen sur l'évolution des ressources vivantes et les activités halieutiques en fonction du changement climatique (déjà !), dont l'UIM a assuré la supervision méthodologique, coordonnant les travaux de laboratoires en France, Espagne, Italie, Portugal, Grèce et Tunisie ; de recherches sur des substances probiotiques issues du plancton dans un contrat avec l'industrie pharmaceutique ; et de travaux sur des systèmes d'information géographique portant spécifiquement sur l'interface terre-mer. Le rapport mentionne également des études de surveillance et d'expertise d'ouvrages locaux (stations d'épuration, fermes aquacoles, etc.).

Une activité phare de l'UIM a consisté en l'opération Delphis réalisée en partenariat avec Marineland, le zoo marin situé dans la plaine d'Antibes, dirigé par Mike Riddell,

7. Conseil scientifique, assemblée générale du 13 décembre 2008.

accueillant un million de visiteurs par an. Il s'agissait de faire des repérages de cétacés au large de la côte provençale et de la Corse, un dimanche d'été, chaque participant se voyant assigné un carré d'un mille de large. Cette opération a été répétée une douzaine de fois entre 1996 et 2008, sous l'égide de l'ONG RIMMO (Réserve internationale maritime en Méditerranée occidentale). Elle a constitué une des toutes premières opérations de science participative d'envergure, contribuant à un suivi, dans la durée, de la faune de cétacés en Méditerranée occidentale, et à une meilleure compréhension des facteurs qui l'affectent.

Tandis qu'il perd progressivement la vue, Maurice Aubert consacre les dernières années de sa vie à des productions de nature spirituelle. Marqué par son éducation chrétienne, et « finaliste » depuis toujours, il s'investit dans des émissions radio-phoniques pour Radio Maria, une chaîne catholique internationale, où il livre ses réflexions sur la convergence entre la vision chrétienne de la création et les enseignements de la science, sur la doctrine écologique du message chrétien, et sur l'éthique de la Bible et des Évangiles (plus de 50 exposés, en direct).

Maurice Aubert décède le 1^{er} septembre 2012. Il est enterré dans le caveau familial à Livron, dans la Drôme, assez loin de la mer, quoique situé aux portes de la Provence.

Un colloque est organisé une année plus tard pour honorer l'œuvre des époux Aubert. Intitulé *La Méditerranée, laboratoire du monde*, participent à ce colloque d'anciens collègues, et notamment les professeurs Jean-Pierre Lozato Giotard et André Dauphiné, pour les aspects scientifiques, et Michèle Gendreau Massaloux, ancienne rectrice de la Sorbonne et de l'Agence universitaire de la francophonie, l'économiste Jean-Louis Reiffers de l'université d'Aix-Marseille, et Thierry Gaudin, le prospectiviste, pour les aspects civilisationnels et culturels.

La direction et la présidence de l'UIM, dont l'activité entretemps s'est réduite aux seules formations maritimes, sont assurées par Mike Riddell. Celui-ci les assume jusqu'en janvier 2018, date à partir de laquelle Jean-Éric Aubert, l'auteur de ce texte, assure la présidence de l'UIM.

Interrogé, en 1972, par le journaliste Pierre Desgraupes dans une émission de télévision qui lui était consacrée, Maurice Aubert se présentait comme un « vieux phoque » ; car, dit-il, « c'est dans le milieu marin que je retourne, dès que je sens un danger sur le rivage ». Effectivement, il avait, comme le phoque, une sorte d'instinct naturel de la mer, mais en se situant bien à l'interface avec la terre, travaillant sur les implications pour la santé et le développement des populations.

Aujourd'hui, l'ensemble des publications scientifiques du CERBOM et de l'UIM de 1958 à 2008 est rassemblé dans un index intitulé « Un demi-siècle d'étude du milieu marin appliquée à l'homme » (185 pages)⁸. S'y trouvent répertoriés : les campagnes océanographiques et les inventaires auxquels elles ont donné lieu, sous la forme de 25 tomes (regroupés par objectifs d'études), 585 articles et communications (avec numéros de référence et répartition par thèmes principaux), et 10 ouvrages (avec leur introduction et leurs tables des matières).

Jean-Éric AUBERT
Président de l'Université internationale de la mer
Président de la Société française de prospective

8. Disponible auprès de l'Université internationale de la mer : <https://www.univ-mer.org> ; email : info@univ-mer.com.

Introduction

Les messages des organismes marins

Depuis deux décennies, une grande partie de nos travaux a porté sur la mise en évidence et l'évaluation de l'importance des sécrétions de micro-organismes marins qui, émises dans le milieu, modifient directement le comportement d'autres espèces. L'ensemble des données que nous avons recueillies sur ce sujet, ainsi que l'analyse de publications diverses traitant d'observations voisines nous ont conduits à concevoir une régulation de la vie biologique marine par l'intermédiaire de substances chimiques, après qu'elles aient été libérées dans le milieu marin par les êtres qui y vivent. Cette notion générale mérite d'être précisée, car elle paraît particulièrement enrichissante pour la compréhension des relations interspèces et celle du déclenchement ou du blocage de certains métabolismes biologiques. Nous en avons proposé une définition, dont nous avons précisé les termes dans une réunion tenue en 1970 par le « Groupe pour l'avancement de la biologie marine » ; cette définition est la suivante : « Les télémédiateurs chimiques sont des substances synthétisées par des espèces marines animales ou végétales, libérées dans le milieu et qui agissent à distance sur le comportement ou les fonctions biologiques de la même espèce ou d'autres espèces. »

Cette définition écarte par principe les actions d'ordre physique ou chimique liées à l'environnement naturel ou artificiellement créé. Ainsi, nous écarterons d'emblée les actions biologiques consécutives à l'injection dans la mer de substances chimiques polluantes d'origine industrielle ; nous croyons également devoir écarter les actions biologiques dues, par exemple, aux apports limoneux des rivières, ou bien les modifications de certaines substances d'origine bactérienne liées à l'insolation.

Cette conception de la régulation des fonctions du milieu marin s'apparente par certains côtés au fonctionnement d'un organisme pluricellulaire où l'équilibre hormonal est sous la dépendance de mécanismes régulateurs créés par des médiateurs chimiques.

Par exemple, il est connu que le fonctionnement des glandes surrénales ou du corps thyroïde est réglé par une autre glande, l'hypophyse, dont une des fonctions est de sécréter des hormones spécifiques agissant, dans une autre partie de l'organisme, sur les cellules glandulaires qui servent de récepteurs. Dans cet exemple, ce type d'action est purement limité à l'organisme où il s'inscrit. Le médiateur chimique ne sort pas de cet organisme dans les différentes parties duquel il est véhiculé par le torrent circulatoire.

Par contre, en milieu marin, le mécanisme analogue que nous décrivons passe par une phase d'extériorisation ; les substances actives sont libérées dans le milieu océanique, et le récepteur est un organisme différent de l'émetteur. Cette comparaison initiale est donc assez imparfaite, puisque l'action de médiation peut s'exercer sur un organisme d'espèce différente et à grande distance. Cette propriété nous a conduits à faire précéder le terme de médiateur chimique du préfixe « télé ».

Certains auteurs ont ouvert cette voie en la considérant jusqu'à présent comme une hypothèse séduisante. Ainsi, Lucas (1947, 1955) a considéré que les relations interspèces n'étaient pas seulement basées sur des phénomènes de prédation mais qu'elles devaient tenir compte des influences biologiques de « métabolites externes » tels que toxines, vitamines, hormones, etc. et a proposé que les organismes peuvent influencer les activités des autres êtres vivants en produisant des microfacteurs nutritifs essentiels ou des composés inhibiteurs. Une synthèse particulièrement intéressante de cette idée a été donnée par Fontaine (1970), que nous croyons devoir citer ici car il propose également une définition, assez voisine de celle que nous avons formulée, et qui par certains côtés complète divers aspects de la nôtre :

« Ce sont toutes des substances organiques qui, libérées par des organismes vivants, agissent à très faible concentration pour régler les rapports entre eux des divers éléments d'une biocénose. »

Il poursuit :

« Ils sont évidemment de nature chimique et de fonctions physiologiques très variées. Le terme d'ectohormone ou de substance ectocrine souligne le rapprochement avec les substances endocrines qui, dans un organisme vivant, assurent "pro parte" la coordination des divers mécanismes ; il est donc particulièrement adapté à ce concept qui vous est aujourd'hui présenté. Celui de télérgone souligne bien l'action à distance de ces substances (entendez : à distance des êtres vivants qui les sécrètent). Celui de phéromone, enfin, est réservé aux substances ectocrines qui agissent sur des individus de même espèce que ceux qui les produisent. »

Il est intéressant maintenant d'envisager quels sont les domaines d'action possibles de ces télémediateurs. Si l'on considère les principales fonctions des espèces marines, on conçoit que la nutrition, la reproduction, les fonctions de défense ou les fonctions de relation peuvent s'exercer par chimiotactisme. Ces diverses fonctions impliquent des mécanismes biologiques variés : attraction nutritionnelle, attraction sexuelle, attraction créant commensalisme et symbiose, attraction migratoire, capacité de synthèse de substances permettant certains métabolismes ou bien de substances d'agression ou de défense. On conçoit très bien que ces mécanismes biologiques puissent s'exercer par l'intermédiaire de substances chimiques qui avertiront certains organismes de la présence d'autres organismes nécessaires à la reproduction, par exemple, à la nutrition éventuellement, ou qui régleront les vastes migrations qui entraînent certaines espèces à travers les espaces marins.

Au point d'avancement actuel de ces travaux, une analyse plus précise des phénomènes connus mérite d'être présentée, à la fois pour faire le point de nos connaissances et pour envisager certains types d'expériences susceptibles de lever plus largement le voile sur les mécanismes intimes de ces fonctions biologiques du monde océanique.

Nous voudrions, à titre d'exemple, citer un certain nombre de faits qui ont constitué une part importante de nos recherches et qui permettent d'analyser ces mécanismes d'action intéressant la microbiologie et la planctologie.

Dans ce domaine, les faits les plus connus concernent l'équilibre biologique existant entre certaines espèces phytoplanctoniques, par exemple l'antagonisme que l'on peut noter entre les populations de Diatomées et celles de Péridiniens. Dans nos travaux antérieurs, nous avons établi une série de graphiques traduisant l'évolution des populations de ces deux groupes de Protistes au cours du temps : cet antagonisme y apparaît d'une manière particulièrement significative. Plus récemment, Pincemin a, par une série d'expérimentations faites au CERBOM, bien mis en évidence cette opposition interspécifique. C'est ainsi que dans sa thèse (1971a), il a décrit l'effondrement d'une population de la Diatomée *Asterionella japonica*, après sa mise en présence du Dinoflagellé *Glenodinium monotis*. Il a pu également montrer que le milieu de culture de cette Diatomée avait une action favorable sur la croissance du Péridinien. Compte tenu du faible taux de croissance des Dinoflagellés par rapport à celui des Diatomées, cette régulation par les substances issues de chacune de ces espèces et rejetées dans le milieu où elles vivent peut apporter certains correctifs à l'envahissement du milieu par les populations de Diatomées ; on constate ainsi le maintien d'un équilibre biologique rationnel entre les deux espèces. On a affaire, dans ce cas, à un mécanisme à deux étages qui met en présence deux types d'organismes liés par au moins deux médiateurs chimiques.

Leur isolement et la détermination de leur nature chimique n'ont pas encore été réalisés.

D'autres auteurs ont signalé des faits analogues : ainsi Pratt a observé un antagonisme naturel entre la Diatomée *Skeletonema costatum* et la Xanthophycée *Olisthodiscus luteus*, sans qu'il ait été possible toutefois d'isoler un médiateur chimique. Des observations analogues ont également été faites en milieu dulçaquicole (Rice et Lefevre).

Autre exemple, celui qu'a rapporté Fontaine sur l'antagonisme qui semble exister entre certaines populations zooplanctoniques et phytoplanctoniques et qui exclut la coexistence permanente entre ces deux groupes. Les auteurs qui ont relaté ces faits supposent que le phytoplancton émet certaines substances et que cette émission, liée à la photosynthèse, aurait tendance à écarter le zooplancton de la biomasse phytoplanctonique, créant ainsi rythmiquement, du fait de l'alternance de la lumière solaire et de l'obscurité, un mécanisme de défense de la biomasse phytoplanctonique et une régulation de la nutrition du zooplancton qui en fait son habituelle nourriture. Cette explication n'est encore qu'une hypothèse car, comme dans les précédents exemples, les substances qui sont produites par ces espèces phytoplanctoniques ne semblent pas avoir été mises en évidence, ni analysées. Le fait semble donc biologiquement démontré, mais il reste inconnu chimiquement.

Nous aborderons maintenant un exemple plus précis, en considérant les mécanismes qui régissent l'équilibre dynamique entre les Diatomées et les bactéries telluriques rejetées en milieu marin. Depuis 1961, nos travaux ont mis en évidence l'antagonisme qui existe entre ces deux groupes de micro-organismes. Contrairement aux cas précédemment décrits, nous avons pu isoler et analyser certains médiateurs chimiques responsables de cet antagonisme. Nos expériences sur ce sujet ont mis en évidence chez certaines espèces de Diatomées la synthèse d'un nucléoside et d'un acide gras, doués d'une activité antibiotique vis-à-vis d'un grand nombre de bactéries telluriques. Il s'agit donc d'un fait biologiquement et chimiquement défini. Dans ce cas également, le phénomène met en cause deux étages de la biomasse océanique.

Au cours de la dernière décennie, d'autres auteurs comme Sieburth ont également démontré que d'autres espèces phytoplanctoniques ou algales exerçaient des actions antibactériennes par l'intermédiaire de sécrétions diverses qu'ils ont analysées (tanins, acide acrylique, dérivés phénoliques, etc.).

Dans le même ordre d'idées, nous signalerons l'antagonisme qui s'établit entre certaines bactéries marines et les bactéries telluriques. Ce fait avait été signalé par ZoBell et Rosenfeld, puis par Krassilnikova. Dans diverses publications nous avons montré l'intérêt de ces antagonismes interbactériens et avons mis en évidence l'existence

d'un médiateur chimique antibiotique de nature lipoglycoprotéique, produit par divers *Alteromonas*. Dans ce cas également, nous avons affaire à un mécanisme à deux étages, biologiquement et chimiquement analysé.

Des observations analogues ont été faites par d'autres auteurs : Sieburth par exemple a montré l'antagonisme existant *in situ* entre le genre *Pseudomonas* et le genre *Arthrobacter* qui serait dû à des substances inhibitrices produites par les *Pseudomonas* et dont la nature chimique n'a pu être encore déterminée.

Une analyse plus approfondie des phénomènes permet de déboucher sur des mécanismes beaucoup plus élaborés, mettant en jeu un nombre plus important d'espèces, et agissant sur des fonctions spécifiques.

Nous donnerons deux exemples, pris parmi nos travaux sur ce sujet. À partir d'une série d'expérimentations faites *in situ* et *in vitro*, nous avons pu démontrer que le voisinage du Dinoflagellé *Prorocentrum micans* et de la Diatomée *Asterionella japonica* conduit au blocage de la synthèse de la substance antibiotique chez cette dernière, ce qui arrête l'action antibactérienne habituellement exercée par cette espèce phytoplanktonique. En collaboration avec Pesando, il nous a été possible de préciser la nature du médiateur chimique excrété par le Péridinien à l'aide d'études spectrographiques, de dosages et de dégradations enzymatiques ; il s'agit d'une protéine que nous avons pu retrouver dans les cellules de *Prorocentrum micans* et dans le milieu où cette micro-algue a vécu. Si dans cette expérimentation nous avons pu analyser les phases successives du phénomène en retrouvant l'origine de l'émetteur initial, d'autres actions analogues ou inverses peuvent être mises en évidence. Ainsi, au lieu d'un blocage de la sécrétion d'antibiotique par la Diatomée, nous avons mis en évidence l'action d'un médiateur qui, au contraire, induit cette synthèse. En effet, selon nos observations, pour que la synthèse de l'antibiotique soit réalisée par la Diatomée, il est nécessaire que dans l'eau de mer où vivent ces Diatomées existent certaines substances mises en évidence par spectrographie, qui nous semblent être de nature nucléoprotéique mais dont nous ignorons la structure chimique exacte et la source d'émission.

Cette action spécifique, dont nous avons pu démontrer les divers mécanismes, s'effectue donc selon un processus à trois étages, dont chaque étape a pu être précisée et chimiquement identifiée. Comparé aux processus à deux étages, ce processus à trois étages fait donc apparaître, indépendamment de télé-médiateurs de type primaire, d'action directe, l'existence des télé-médiateurs de type secondaire, dont l'action est indirecte.

Ces phénomènes intéressant plancton et bactéries sont assez voisins de ceux qui ont également pu être mis en évidence dans notre laboratoire, entre bactéries marines

et bactéries telluriques. En effet, il est apparu que les effets de certains antibiotiques produits par des *Alteromonas* peuvent être annulés en présence d'autres bactéries marines d'espèces différentes (*Achromobacter*, *Flavobacterium*).

Il apparaît en outre que, comme chez les Diatomées, l'induction de cette sécrétion peut être réalisée par l'action de télémédiateurs issus d'autres bactéries marines d'espèces également différentes.

Cet ensemble de faits concernant les micro-organismes marins, que nous avons rapidement résumés et qui constituent des exemples typiques des connaissances actuelles concernant les télémédiateurs chimiques en milieu marin, implique certaines réflexions qui nous paraissent nécessaires pour que cette recherche ne s'égare pas mais au contraire s'enrichisse. Ainsi, il apparaît clairement que l'on ne peut admettre la réalité d'un phénomène de télémédiation que dans la mesure où il a pu être prouvé qu'un médiateur chimique existe bien dans l'eau de mer naturelle, et que celui-ci reproduit bien le phénomène considéré après son isolement à partir de ce milieu.

D'autre part, ainsi que nous l'avons déjà souligné, l'examen des exemples cités fait apparaître l'existence de deux mécanismes d'actions télémédiatrices : l'une de type primaire, dans les cas où le télémédiateur synthétisé par une espèce contrôle directement le métabolisme d'une autre espèce ; l'autre de type secondaire, où le télémédiateur synthétisé par une espèce provoque une action métabolique sur une autre espèce, qui, à son tour, contrôle une troisième espèce. On conçoit que la combinaison de ces deux mécanismes et leur développement en cycle puissent conduire à des phénomènes de rétroaction réglant certaines relations interspécifiques. Nous avons pu mettre en évidence quelques-uns de ces processus d'autorégulation : ainsi, l'abondance de bactéries telluriques dans les eaux résiduaires libère des produits – tels que la vitamine B12 – qui favorisent la croissance de certaines espèces d'algues antibioproductrices qui, à leur tour, bloquent la prolifération des bactéries telluriques.

Par ailleurs, en examinant les résultats expérimentaux, il semble que l'on puisse avoir affaire à deux types d'action : l'un où le télémédiateur apparaît comme un « métabolite » pour le récepteur, par exemple l'influence des « métabolites externes » sur les équilibres écologiques marins décrite par Lucas ; l'autre où, du fait de son seuil d'activité très faible, ce télémédiateur apparaît comme un « signal » au sens informatique du terme : ainsi, les taux très faibles auxquels nous avons trouvé la protéine responsable du blocage de la fonction antibiotique chez *Asterionella japonica* suggèrent fortement une activité purement messagère telle qu'on la conçoit en génétique. Reste évidemment à situer le lieu d'action du médiateur au niveau des composants de la cellule. Cette recherche doit faire appel à la biologie cellulaire et moléculaire, et devrait donc être l'objet de travaux interdisciplinaires.

Ainsi, il apparaît que cette voie de recherche originale qui, à la suite de l'isolement et de l'analyse chimique d'un certain nombre de télémediateurs est définitivement sortie de l'état d'hypothèse pour entrer dans le cadre de faits expérimentaux, débouche vers une connaissance plus intime de la régulation de la vie marine en faisant appel aux conceptions de l'informatique.

Indépendamment de ces considérations purement théoriques, nous voudrions par ailleurs attirer l'attention sur la fragilité de ces mécanismes. L'introduction de produits chimiques industriels variés dans le milieu marin peut entraîner des modifications dans la structure des composants biologiques de l'eau de mer, et détruire ou modifier ces « métabolites » ou ces « signaux » : on risque donc d'aboutir à une dérive de cet équilibre océanique. Si bien que, indépendamment de l'aspect purement fondamental des recherches qui sont poursuivies dans ce domaine des télémediateurs chimiques, il est souhaitable qu'elles soient couplées à des travaux sur l'influence des polluants qui détruiraient ou qui altéreraient ces messagers essentiels au maintien d'un certain équilibre de la vie marine.