

De la vague à l'âme : un demi-siècle de la vie d'un océanographe

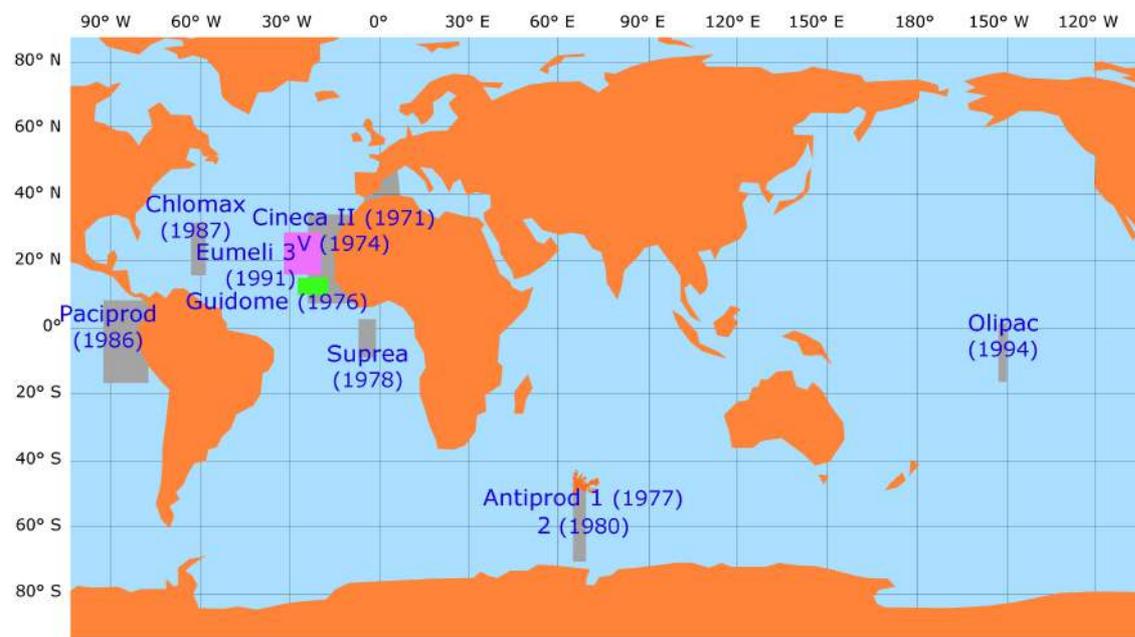
Guy JACQUES

La belle aventure du groupe Mediproduct

L'océanographie, une science jeune

La campagne autour du monde du navire britannique *Challenger*, entre 1872 et 1876, que nous avons détaillée, marqua bien la naissance de l'océanographie hauturière en lançant une série d'expéditions lointaines de navires allemands (*National*, 1889, *Valdivia*, 1871-78) autrichiens (*Herta*, 1876-79), belges (*Belgica*, 1897-99) de la France (*Travailleur* et *Talisman*, 1880-83), russes (*Vityaz*, 1886-89), américains (*Blake*, 1877-86, *Tuscarora*, 1874-75, *Albatross I*, 1882-1883, *Albatross II*, 1883-1921), hollandais (*Siboga*, 1889-1900), norvégiens (*Fram*, 1893-98) et du Prince Albert 1^{er} de Monaco qui, entre 1875 et 1921, mène des campagnes en Méditerranée et dans l'Atlantique avec ses navires de mieux en mieux aménagés : l'*Hirondelle I*, la *Princesse Alice I*, la *Princesses Alice II* et, enfin, l'*Hirondelle II*. Un demi-siècle plus tard, le navire allemand *Meteor* (1925-27) et l'*Albatross* suédois (1947-48) firent entrer l'océanographie dans le modernisme avec des campagnes préparées par les organismes de recherche et des laboratoires spécialisés. Dans le même temps, particulièrement en Europe, les stations marines permirent aux naturalistes d'étudier, durant les vacances universitaires, la biologie marine en zone littorale. Après que la Belgique eut fondée la station marine d'Ostende en 1843, la France en créa une dizaine entre 1859 (Concarneau) et 1891 (Tamaris) avec, notamment, Roscoff (1872), Banyuls-sur-Mer (1882), Villefranche-sur-Mer (1884) et Endoume (1888). Jean-Marie Pérès écrivait d'ailleurs en 1972 : « l'extraordinaire floraison de laboratoires maritimes sur les côtes de France découle à la fois de la diversité de celles-ci et de l'esprit individualiste des Français ».

La naissance du groupe Mediproduct

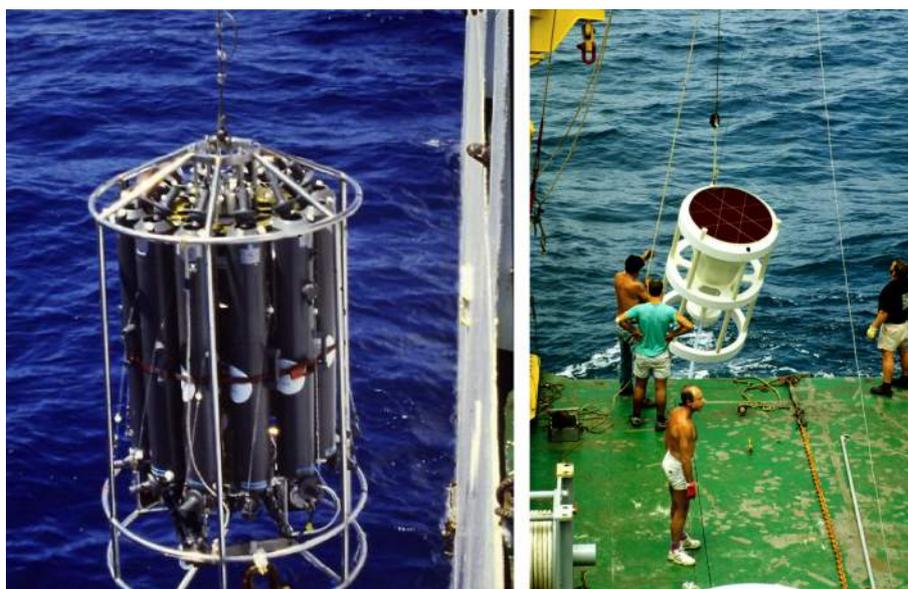


32 Ensemble des campagnes menées par le groupe Mediproduct en dehors de la Méditerranée.

Si l'équipe que nous allions former a pu rapidement naître et obtenir les moyens nécessaires à une recherche ambitieuse, elle le doit à ce qu'elle a pu opérer en terrain vierge, aucune recherche n'étant alors menée sur l'écologie pélagique. Il y avait en effet une génération d'écart entre ceux qui relancèrent l'océanographie et leurs disciples (Pierre Drach et Paul Bougis,

Henri Lacombe et Paul Tchernia, Alexandre Ivanoff, Jean-Marie Pérès et André Bourdillon) et notre génération qui allait l'insérer dans le concert international et parcourir l'océan mondial (Figure 32).

En Europe, dans le domaine du plancton deux nations menaient déjà des recherches actives : les Anglais de Plymouth en Manche, les Espagnols en Méditerranée et en Atlantique dans le sillage du grand écologue catalan Ramon Margalef qui a formé la plupart des phytoplanctonologues français de cette période. Sur le golfe du Lion lui-même, notre première région d'étude commune, les connaissances récentes sur la circulation et sur le zooplancton venaient de deux sources : deux notes de Paul Bougis (1958) sur les courants superficiels et sur les plongées d'eau dans le sud du golfe du Lion (en collaboration avec Mario Ruivo, 1954) et une série d'articles de Charles Allain et Jean Furnestin sur l'hydrologie de la Méditerranée nord-occidentale à partir de données récoltées lors de campagnes du *Président Théodore Tissier* de l'ISTPM entre 1960 et 1963.



33 Les deux instruments mythiques de nos missions océanographiques : la bathysonde et sa rosette de bouteilles de prélèvements (à gauche) et le piège à particules.

Le groupe *Mediproduct* a utilisé la bathysonde à bord du *Jean Charcot* dès la campagne *Mediproduct III* de 1972. Quant au piège à particules (ici un modèle français PPS 5), il sert à quantifier les flux verticaux de particules. Il a été déployé sur des mouillages de longue durée dans le cadre du programme international JGOFS. Ici à la « manœuvre », torse nu, le géochimiste Patrick Buat-Ménard durant *Eumeli 3* dans l'Atlantique tropical en 1991.

Je ne me souviens plus qui prit l'initiative de la réunion fondatrice de ce qui deviendra le groupe *Mediproduct*. Ce qui est certain c'est que les « mains libres » dont j'ai parlé nous permirent des contacts directs en négligeant la soi-disant rivalité entre les 3^{ème} cycles de Marseille et de Paris. Déjà, sur le site de Villefranche, biologistes et physiciens (Paul Nival et Jacques Gostan) s'étaient rapprochés et avaient entamé un suivi régulier des caractéristiques du milieu pélagique sur une demi radiale entre Nice et Calvi en profitant de la venue du navire côtier *Korotneff* ; ce programme *Hydrokor* se prolongea jusque dans les années 1980 sous la conduite de Louis Prieur. Le départ de notre groupe interdisciplinaire (optique marine, physique, chimie, phyto- et zoo-plancton) et inter laboratoires tint à un noyau de chercheurs : Hans Joachim Minas (production primaire), son leader charismatique, et Bernard Coste (sels nutritifs) de Marseille, André Morel et Louis Prieur (optique, physique), Paul Nival (zooplancton) de Villefranche, Alain Thiriot, Claude Razouls (zooplancton) et moi-même (phytoplancton, pigments) de Banyuls. Étant tous en train d'achever nos thèses d'État sur des aspects différents du milieu pélagique dans l'aire de nos laboratoires, nous unîmes nos forces pour demander et obtenir des campagnes à la mer sur le tout nouveau *Jean Charcot*. Durant les trente années

d'activité du groupe *Mediproduct*, nous sommes passés de la palanquée¹ de bouteilles d'hydrologie à la bathysonde et à sa rosette (Figure 33), du spectrophotomètre à l'HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*). En français : chromatographie en phase liquide à haute performance), du positionnement prédéterminé des stations d'étude à leur localisation en fonction de caractéristiques analysées en temps réel par les satellites, de l'eutrophie à l'oligotrophie et, enfin, d'une logique de recherche tendue vers la connaissance du réseau trophique dans l'espoir d'améliorer l'efficacité de la pêche à l'intégration dans les programmes climatiques, la production primaire étant la porte d'entrée de la séquestration du CO₂ dans l'océan par voie biologique. Déjà intégrées au programme international *Cineca*² dès les années 1970, nos campagnes devinrent, notamment avec *Eumeli*, partie intégrante de JGOFS (*Joint Global Ocean Flux Study*, 1987 à 2003). D'autres ont poursuivi cette aventure dans le cadre d'autres programmes internationaux, notamment *Solas* (*Surface Ocean – Lower Atmosphere Study*) développé en France sous le nom de *Proof* (PROcessus biogéochimiques dans l'Océan et Flux) à partir de 1995. C'est aussi le programme *Eumeli* qui nous a vu devenir les « champions français » de l'utilisation des pièges à particules (Figure 33).

1960-70, début de l'« âge d'or » de l'océanographie

Notre aventure a été permise parce que la décennie 1960-70 a procuré aux chercheurs nouvellement recrutés les moyens nautiques et la création de structures adaptées. Créée en 1961, la DGRST³ a donné une impulsion formidable à l'océanographie en créant le Comexo⁴ et en finançant la construction du *Jean Charcot* lancé en 1965. Ce navire de 72 mètres permit à des équipes pluridisciplinaires d'accéder à tous les océans. En même temps, le CNRS mit en place, en 1966, une section interdisciplinaire d'océanographie « horizontale » (la commission 51, évaluant seulement les laboratoires et gérant les moyens lourds) qui devient en 1971 « verticale » (section 12 « océanographie ») avant d'intégrer, en 1976, la physique de l'atmosphère (section 16 « océanographie et physique de l'atmosphère ») bien avant que les interactions océan-atmosphère deviennent un sujet prioritaire. Suivent la création, en 1967, du Cnexo, qui donnera ultérieurement naissance à l'Ifremer en fusionnant avec l'ISTPM, dont nous avons déjà parlé, et l'ouverture, en 1969, du Centre océanologique de Bretagne, à Brest, et la poursuite du lancement de navires que le groupe *Mediproduct* a utilisé : le *Jean Charcot* (huit campagnes entre 1969 et 1990) : le *Capricorne* (lancé en 1970, 46 mètres : une campagne en 1974), le *Suroît* (1975, 56 mètres : trois campagnes entre 1986 et 1996), le *Marion Dufresne 1* (1973, 120 mètres : trois campagnes de 1977 à 1984) et *L'Atalante* (1990, 85 mètres : deux campagnes en 1991 et 1994).

La permanence de notre action sur une longue période de temps doit beaucoup à la reconnaissance de notre activité par le CNRS d'abord sous la forme d'une Recherche coopérative sur programme (RCP 247, de 1970 à 1979, sous la responsabilité de « Hakim », autrement dit Hans-Joachim Minas) puis d'un Groupement de recherches coordonnées (Greco Production pélagique et phénomènes physiques dit « P4 » de 1980 à 1988, successivement animé par Minas puis par moi-même secondé par Bernard Coste). Le Greco, « laboratoire sans murs », né de la fusion du groupe *Mediproduct* de la RCP 247 avec deux RCP connexes, noua de nombreuses relations avec le Muséum et l'Orstom⁵ dans le cadre notamment du programme international *Cineca* (1972-75), une étude approfondie des upwellings marocain et mauritanien.

¹ Série d'instruments de prélèvement (bouteilles) et de mesure (thermomètres) montés en batterie ou sur une ligne pour une station océanographique.

² Cooperative Investigations in the North of the Eastern part of the Central Atlantic (1972-75).

³ Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique,

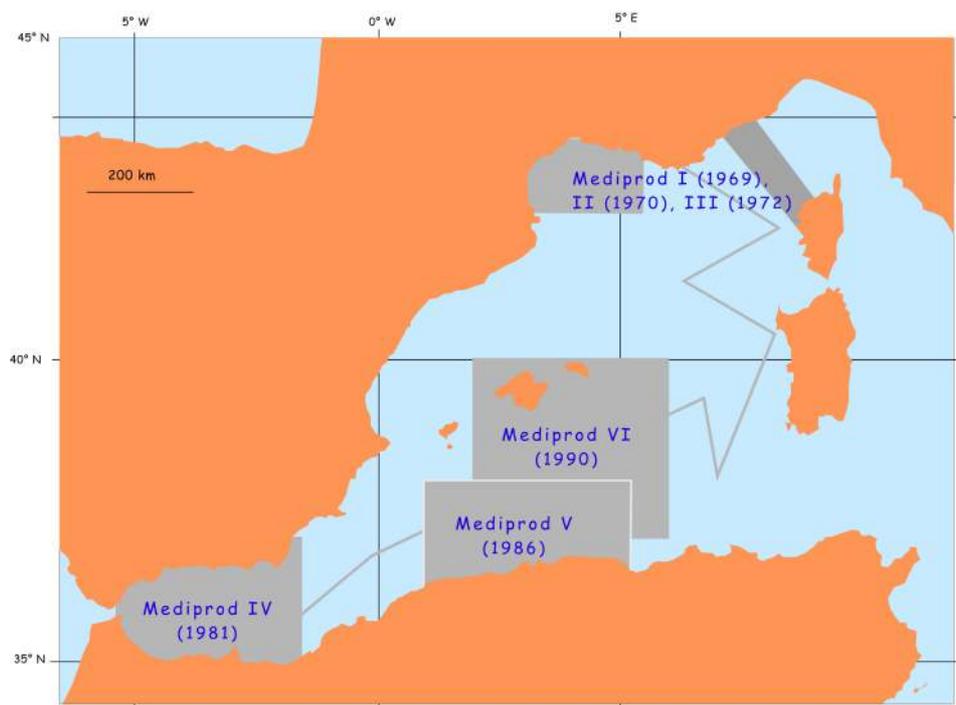
⁴ COMité pour l'EXploitation des Océans

⁵ Office de Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer devenu, en 1998, l'IRD, Institut de Recherche pour le Développement.

La Méditerranée, berceau de l'océanographie pélagique en France

Hydromed 1, en mars 1966, le pied à l'étrier pour Mediproduct

Cette campagne à bord du *Jean Charcot*, la première de ce navire me semble-t-il, était consacrée à l'hydrologie. Mais les physiciens du Muséum national d'histoire naturelle de Paris (Henri Lacombe, Paul Tchernia) avaient accepté d'embarquer des planctonologues de Banyuls et des chimistes du Centre d'océanologie de Marseille, Bernard Coste et Hans Joachim Minas. Par leur rigueur méthodologique, leur esprit d'équipe et, surtout, grâce à leur aptitude à interpréter les caractéristiques chimiques (teneur en oxygène, sels nutritifs) pour améliorer la connaissance des masses d'eau, ils ouvrirent des horizons aux océanographes physiciens. En retour, je suis convaincu que le groupe *Mediproduct* qui allait naître bénéficia d'une reconnaissance de ces spécialistes.



34 Campagnes méditerranéennes du groupe Mediproduct.

De Mediproduct I en 1969 à Mediproduct VI en 1990, toutes en Méditerranée occidentale, notre groupe a bien mérité de s'appeler « Mediproduct », d'autant que toutes les thèses d'État (soutenues entre 1968 et 1971) de ses fondateurs ont été réalisées sur les aires littorales du golfe du Lion.

Mediproduct I, en mars 1969, la campagne fondatrice

Mediproduct I en mars-avril 1969, première campagne demandée et aussitôt obtenue, représente l'acte fondateur de notre groupe qui réalisa de nombreuses campagnes en Méditerranée occidentale (Figure 34) avec une réalisation que je peux aujourd'hui qualifier de « à l'ancienne ». Il s'agissait d'un réseau dense de stations prépositionnées (48) dans le golfe du Lion et en mer Ligure répété deux fois à un mois d'intervalle. Ce décalage permettait de se situer à la fin du mélange hivernal apportant en surface des sels nutritifs, les « engrais » de la mer (première quinzaine de mars) puis au moment de la floraison printanière (première quinzaine d'avril), le phytoplancton profitant de ces éléments minéraux, de l'élévation de la température des eaux superficielles et de l'éclairement croissant pour se multiplier rapidement. Le terme « à l'ancienne » s'applique aussi aux méthodes de prélèvement et d'analyse à bord car la fréquence des stations ne permettait guère d'effectuer à bord des mesures un peu délicates. Les paramètres mesurés immédiatement ou presque se limitaient à la température, la salinité, la teneur en oxygène et la concentration en pigments (Figure 35).



35 À bord du Jean Charcot lors de la campagne Mediproduct I en mars et avril 1969. Mise à l'eau de filet à plancton triple WP2 et Lucien Gambéroni dosant l'oxygène à bord.



36 La photo culte du groupe Mediproduct sur le pont du Jean Charcot lors de la campagne Mediproduct I en 1969.
 (de gauche à droite en haut) : Louis Prieur, Jacques Boutler, Jacqueline Goy, Jacques Gostan, Serge Poulet, Alain Thiriot, Guy Jacques, Bertrand Hirel, Jean Boucher, Hans-Joachim Minas, Francis de Bovée, Rodrigo Soares, Suzanne Nival, technicien Endoume ?
 (assis de gauche à droite) : Paul Nival, Jean Géronimi, Marie-Claude Gras, Bernard Coste, Monique Minas.

Le choix prioritaire de la Méditerranée par le groupe *Mediprod* (Figure 36) lors des premières campagnes, tint à ce que les principales équipes engagées œuvraient dans des stations marines méditerranéennes et que les fondateurs du groupe préparaient leurs thèses d'État entre la cote catalane, les parages de Marseille et la mer Ligure. Mais ce n'est pas la seule raison puisque ce fut aussi le terrain privilégié de recherche du Laboratoire d'océanographie physique du Muséum dirigé par Henri Lacombe. La Méditerranée est parfois présentée comme un « modèle réduit d'océan », ce qui plait à certains et en irrite d'autres. Je suis assez partisan de ce terme car, comme Jason, la Méditerranée présente, spécialement dans sa partie nord-occidentale qui fut notre terrain d'étude privilégié, deux visages. En été, ses eaux superficielles, qui dépassent 22 °C, sont séparées des eaux profondes, dont la température avoisine 13 °C, par une thermocline, c'est à-dire une zone de variation très rapide de la température. En cas de mistral qui homogénéise encore plus les eaux superficielles, la température peut descendre de près de dix degrés en cinq mètres. Les plongeurs connaissent bien ce phénomène ! Cette situation rappelle les océans tropicaux où cette structure thermique est permanente. En hiver, à l'inverse, les mouvements verticaux qui l'affectent peuvent être rapprochés des plongées d'eau en mer de Norvège ou du Labrador. Cette apparente anomalie tient à ce que les eaux profondes de la Méditerranée, bassin semi fermé par le seuil de Gibraltar qui se situe à trois cents mètres de profondeur, présentent une température proche de 13 °C. Dans l'Atlantique Nord, cette température est inférieure à 1,6°C. Pour que les eaux de surface atteignent une densité supérieure aux eaux plus profondes dans le nord de l'Atlantique Nord, il faut qu'elles descendent en dessous de 1 °C. En Méditerranée, le même phénomène implique seulement un refroidissement des eaux de surface vers 10 °C. Dans le golfe du Lion, en février-mars, quand mistral et tramontane soufflent avec violence sur de longues périodes, la baisse de la température et l'élévation de la salinité (évaporation) suffisent à rendre les eaux superficielles plus lourdes que celles sous-jacentes. Il se crée alors une convection verticale qui peut atteindre mille à deux mille mètres. On observe parfois, dans des zones évidemment limitées, des « cheminées » où la température demeure homogène de la surface au fond.

Mediprod I, et ce n'est pas un hasard, était associée à la campagne d'océanographie physique du Muséum, *Medoc*, dans la même zone et sur le même navire. *Medoc* s'est déroulée du 1^{er} au 27 février puis du 18 au 31 mars 1966, *Mediprod I* du 1^{er} au 15 mars et du 3 au 17 avril. Lucien Gambéroni et Jean Géronimi, ingénieurs du Laboratoire d'océanographie physique du Muséum, ont contribué aux palanquées d'hydrologie et ont dosé la salinité et l'oxygène durant ces deux mois et demi. Vous imaginerez aisément leur joie et leur état de fatigue quand on connaît l'état de la mer dans le golfe du Lion à cette période. Assez peu attiré par les mers déchaînées, je me serais volontiers contenté de la première partie de la campagne ; mais au dernier moment j'ai dû remplacer Michel Panouse pris par d'autres occupations plus sentimentales...

L'histoire de l'océanographie pélagique moderne peut se schématiser par l'évolution du prélèvement d'eau de mer et de la mesure de sa température, évolution représentée sur la Figure 37.



1



2



3



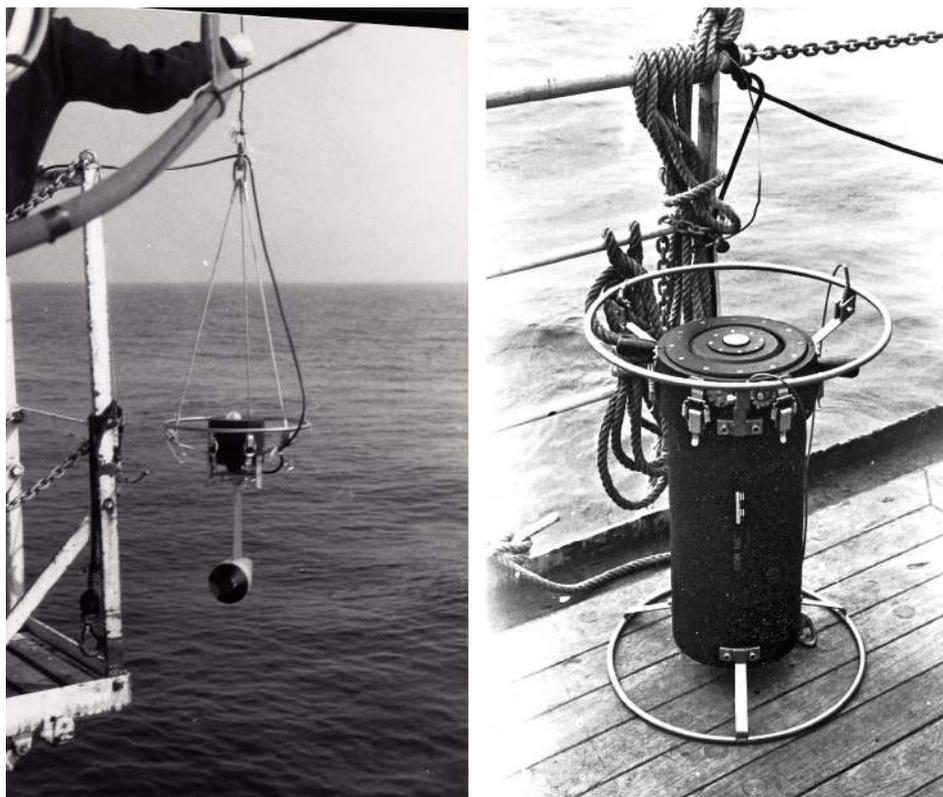
3



4

37 Prélèvements d'eau dans les années 1970.

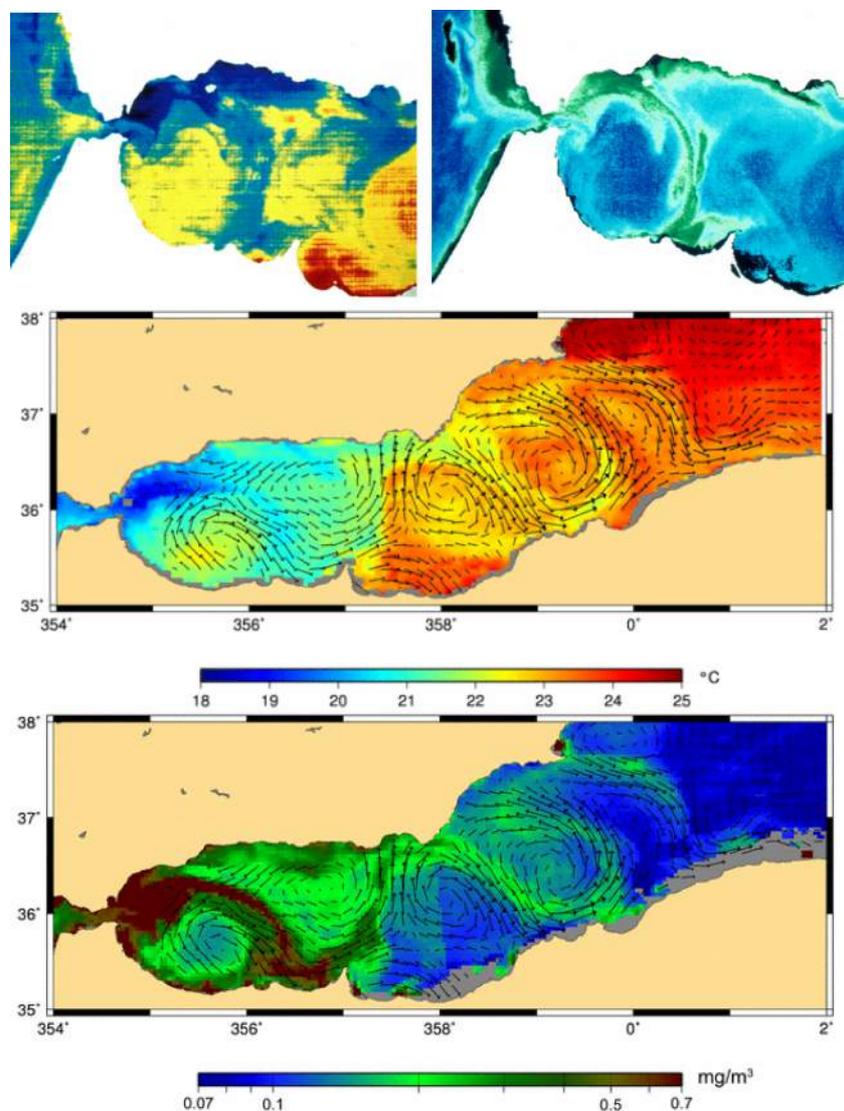
Jusqu'à la généralisation de l'ensemble bathysonde + rosette de bouteilles de prélèvement de grand volume, deux opérations différentes étaient réalisées : 1) les bouteilles d'hydrologie métalliques à renversement (1) équipées de thermomètres Richter & Wiese fort coûteux nécessitant une lecture précise à la loupe (2) de la température à la profondeur de renversement de la bouteille, opération qui rompt la colonne de mercure du thermomètre. Un peu plus tard ces bouteilles Nansen ou Mécaboliér (marque française) seront remplacées par des bouteilles en PVC NIO (3) où seul le compartiment des thermomètres se renversait à la profondeur choisie ; 2) des bouteilles de PVC de grand volume, ici des Van Dorn (4) dont les clapets de fermeture étaient des débouches-évier relativement peu fiables. Respectivement « à la manœuvre » Rodrigo Soares (1), Jacques Gostan (3) et Guy Jacques (4), heureux d'être à l'air sur le pont plutôt qu'à l'intérieur du *Charcot*.



38 Deux appareils d'optique sous marine régulièrement utilisés lors des campagnes du groupe Mediproduct : le quantum-mètre (gauche) et le spectro-irradiance-mètre (droite).

Avec le Laboratoire de physique et chimie marines, *Mediproduct* a bénéficié de ce qui se faisait de mieux pour l'étude des propriétés optiques des eaux. Je suis même convaincu qu'aucune autre nation ne s'est appuyée, ni alors ni depuis, sur des études aussi complètes. Le professeur Ivanoff avait en effet eu l'idée originale de confier à quatre de ses élèves la mise au point et la réalisation de quatre appareils différents : une thermopile (Béthoux & Ivanoff, 1970), un quantum-mètre (Prieur, 1970), un spectro-irradiance-mètre (Bauer & Ivanoff, 1970) et un bathy-irradiance-mètre (Bauer & Ivanoff, 1970). Tous ces appareils (Figure 38) ont été régulièrement utilisés lors de nos campagnes qui ont constitué le fond principal des données de ce laboratoire qui a intensément publié dans les plus grandes revues. L'équipe d'André Morel était alors partie prenante du groupe de travail de l'Unesco *Photosynthetic radiant energy in the sea* mis en place en 1964 par John Tyler dont l'objectif était de mesurer l'énergie radiative disponible à toute profondeur et sa répartition spectrale dans le domaine utilisable pour la photosynthèse, soit 350 à 700 nanomètres. Ces recherches culminèrent en 1970 lors d'une campagne du *Discoverer* dans le Pacifique sud-est, en mer des Caraïbes puis en mer des Sargasses. Ce rapprochement entre opticiens et biologistes (mesure des pigments, production par les méthodes oxygène et ^{14}C) de diverses nationalités allait devenir la constante du Laboratoire d'océanographie physique de Villefranche. À partir de 1970, une orientation spécifique majeure fut prise par ce laboratoire vers les mesures optiques du rayonnement émergent de l'océan qui fournissent une information sur le contenu des eaux et, en particulier, s'agissant de l'océan ouvert, sur la concentration en chlorophylle. En effet, les eaux très pauvres en phytoplancton (oligotrophes) sont d'un bleu profond tandis que, la teneur en chlorophylle croissant, la couleur de l'eau devient de plus en plus verte puis brunâtre. Cette information radiométrique est détectable depuis l'espace malgré l'interposition de l'atmosphère. La grande aventure de cette fin de décennie fut le lancement par la Nasa du capteur « couleur de l'océan » dénommé CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*). Le LPCM prit une part active dans l'interprétation des signaux de ce capteur (algorithmes de correction atmosphérique et de

quantification de la chlorophylle). Après CZCS, qui fonctionna de 1978 à 1984, d'autres capteurs furent mis en orbite par la Nasa (*SeaWiFS*, *Modis*) puis par l'Agence spatiale européenne (*Meris*). Ce même laboratoire s'intéressa aussi à l'activité spatiale, à l'optique des cellules phytoplanctoniques et autres bactéries, à leurs propriétés diffusantes et absorbantes. L'utilisation de la télédétection suite à la campagne *Mediprod IV* à l'automne 1981 en mer d'Alboran souligne l'avancée de notre groupe dans cette approche ; il suffit de comparer les images de 1982 à celles traitées trente ans plus tard par *Aviso*⁶ du Cnes⁷ (Figure 39).



39 La mer d'Alboran vue par les satellites.

L'eau atlantique superficielle, froide et peu salée, qui pénètre en Méditerranée par le détroit de Gibraltar génère une série de tourbillons (le terme anglais *gyre* est parfois utilisé) anticycloniques (sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord) et cycloniques d'une durée de vie de quelques mois à deux ou trois ans. Ils transportent des quantités d'eau importantes et rehaussent la production primaire. Le groupe Mediprod, notamment Claude Millot et Louis Prieur, se sont intéressés à ces mécanismes bien au-delà de la mer d'Alboran.

La figure du haut représente les distributions superficielles de la température (gauche) et de la chlorophylle (droite) fin juin 1982, analysées à partir du capteur CZCS par André Morel et Annick Bricaud. Les zones les plus froides, en bleu, sont également les plus riches en phytoplancton, en vert. Les images obtenues en juillet 2012, par le Cnes sont similaires.

Après l'hydrologie, le quantum-mètre était le premier appareil mis à l'eau car il permettait de déterminer les « profondeurs photométriques » indispensables à l'incubation des échantil-

⁶ Aviso : Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques.

⁷ Cnes : Centre National d'Études Spatiales.

lons pour la mesure de la production primaire par la méthode du ^{14}C puis, un peu plus tard, l'estimation des productions « nouvelle » et « régénérée » en utilisant ^{15}N . En effet, soit mouillés sur une ligne laissée en mer une demi-journée solaire, soit à bord, dans un incubateur placé sur le pont du navire à température régulée derrière des écrans absorbant une partie de la lumière solaire (Figure 36), les échantillons d'eau de mer contenant leur phytoplancton étaient positionnées à des profondeurs photométriques standards : 100 % de lumière de surface (0 mètre), 50 %, 30 %, 10 %, 3 % et 1 %, ce dernier niveau étant considéré alors comme le bas de la couche où la photosynthèse était possible. Depuis, on a montré que certaines algues pouvaient croître à des profondeurs où arrive seulement un millième de l'éclairement superficiel. Les autres mesures d'optique étaient réalisées au plus près du midi solaire pour obtenir le signal maximum de manière à étendre les mesures en profondeur et, surtout, pour minimiser l'influence de l'angle solaire sur la réflectance⁸ des eaux, très complexe à prendre en compte si l'on souhaite rendre comparables les diverses mesures.

J'ai cependant un regret : celui d'avoir vu se généraliser quelques années plus tard dans la plupart des centres d'océanographie et de limnologie mondiaux l'utilisation d'un quantamètre américain. Comme souvent, la France a certainement manqué là une commercialisation d'un équipement. Le Cnexo avait pourtant réuni les scientifiques pour définir l'appareillage d'optique à réaliser en petite série. La majorité des présents, qui menaient pourtant des recherches autour de la production primaire, choisirent la thermopile alors qu'il aurait été plus logique d'opter pour le quantum-mètre qui permet de mesurer le flux de photons dans la colonne d'eau, c'est à dire la seule partie du spectre lumineux utile à la photosynthèse. Un coup de pouce du Cnexo et un financement de la DGRST auraient peut-être suffi pour passer de ces prototypes, construits par la société Doignon & Magot à Arcueil-Cachan, à une production industrielle. Mais l'Université du Nebraska à Lincoln fut plus efficace. Souhaitant cultiver du sorgho à des fins alimentaires elle mit au point tout un arsenal technique dont un quantamètre précis et peu couteux (Biggs *et al.*, 1971). Très rapidement les scientifiques souhaitant mesurer la radiation photosynthétiquement active se dotèrent de cet appareil fabriqué par la société Lambda instruments corporation cofondée en 1971 par son inventeur William Biggs ; en 1978, cette société devint LI-COR.

In situ veritas !

Mesurer ou estimer la production primaire du phytoplancton et ses facteurs de régulation consistait l'objectif central de *Mediproduct*. Une méthode-reine fleurissait alors, bien avant l'utilisation de la télédétection, l'utilisation d'un traceur radioactif, le ^{14}C . Il suffisait d'ajouter à l'échantillon d'eau de mer contenant son phytoplancton (à la sortie de la bouteille de prélèvement, l'eau de mer était filtrée sur une soie de 300 μm pour éliminer une bonne partie du zooplancton qui aurait pu consommer les algues unicellulaires durant l'expérimentation) une quantité infime mais connue de carbone inorganique dissous radioactif. Par photosynthèse, le phytoplancton absorbe le carbone inorganique dissous, qu'il soit ou non radioactif, et l'assimile dans sa propre matière organique. En fin d'expérience, le phytoplancton était filtré sur des membranes de porosité inférieure à 1 μm et la radioactivité du filtre mesurée. En connaissant la radioactivité ajoutée, on en déduisait la quantité de carbone organique photosynthétisée durant le temps d'exposition à la lumière.

⁸ La réflectance, ou facteur de réflexion, est le rapport entre le flux lumineux réfléchi et le flux incident. En climatologie, elle est nommée albédo.



1



2



3

4



40 Incubations pour la mesure de la production primaire. 1 et 2 – Préparation et mise à l'eau de bouteilles de 10 litres pour la mesure de l'assimilation des différentes formes d'azote (méthode au ^{15}N). 3 – Ensemble permettant en même temps, le prélèvement de l'échantillon, l'inoculation du ^{14}C et son incubation sans remonter la ligne. Ce Let Go (laisser aller) a été mis au point par Yves Dandonneau, d'où le nom de « dandonnette » que nous lui avons affectueusement attribué. 4 – La plateforme hélicoptère du Marion Dufresne encombrée des incubateurs in situ simulée pour les méthodes ^{14}C et ^{15}N .

À nos débuts, notre credo était *in situ veritas* ! (Figure 40) Nous préférons, après y avoir ajouté le ^{14}C , accrocher les petites bouteilles de verre (généralement 125 millilitres) sur une ligne de manière à ce qu'elles retournent à leur profondeur d'origine et y demeurent une demi-journée solaire. En fin de journée, le navire revenait sur le point de mouillage pour récupérer les échantillons. Sans GPS, la recherche de la bouée signalant le mouillage fut parfois délicate. De manière à ne pas mobiliser le navire, il arrivait aussi que nous incubions les échantillons sur le pont du navire en restituant les intensités lumineuses des profondeurs optiques par l'interposition de toiles métalliques de différentes porosités. Cette méthode dite *in situ* simulée a été utilisée tant pour la mesure de la production primaire par le ^{14}C que pour celle des productions « nouvelle » et « régénérée » avec les traceurs ^{15}N qui nécessitaient des bouteilles de verre fragiles de 10 litres !

L'homme qui murmurait à l'oreille de l'oxygène



41 *La bouée-laboratoire Bohra 1 conçue par le commandant Cousteau et l'un de ses utilisateurs, Hans Joachim Minas.*

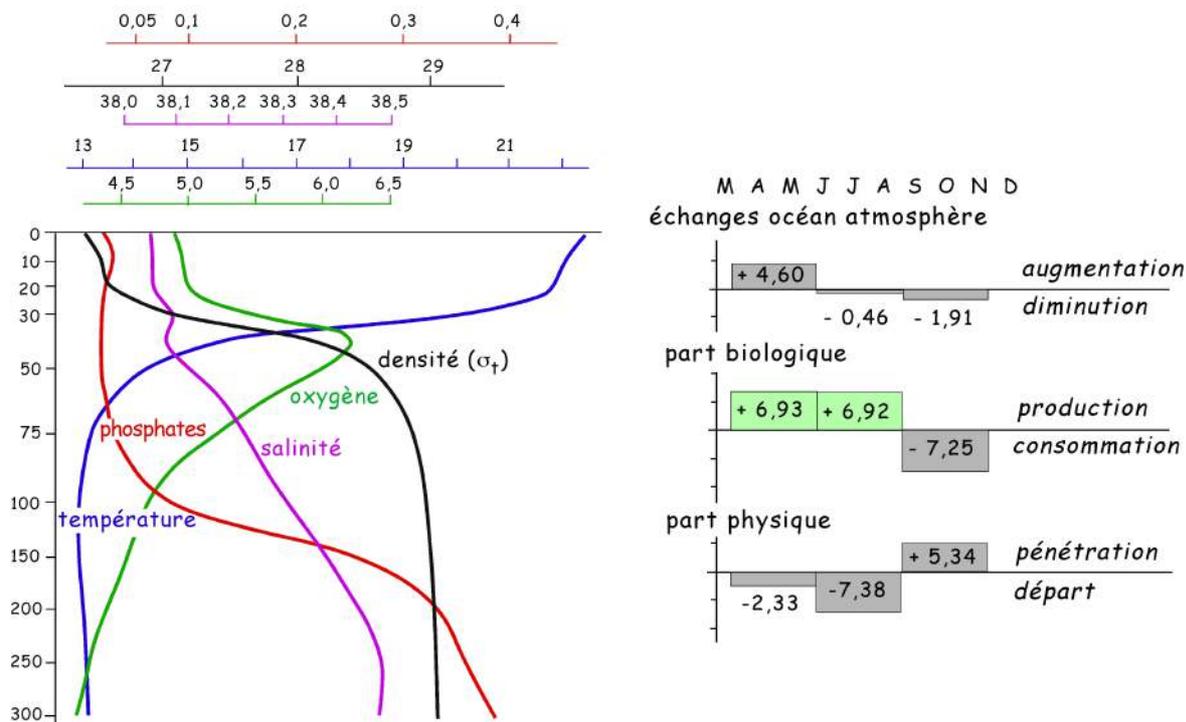
Mouillée en 1964 dans la rade de Villefranche, elle rejoignit son mouillage définitif en mai 1968 en mer Ligure au milieu d'une ligne joignant Nice à la Corse. Elle sera désarmée en 1970. J'ai eu la chance de séjourner sur cette bouée une quinzaine de jours et de me baigner sur des fonds de plusieurs milliers de mètres. Il fallait nager à contre-courant car la bouée ne disposait pas de moyens nautiques : un marin est d'ailleurs décédé à la suite d'une telle baignade.

L'utilisation de l'évolution temporelle des teneurs en oxygène pour estimer la production primaire (figure suivante) doit beaucoup à celui que tous les « médiprodiens » considèrent comme leur inspirateur, le chimiste Hans Joachim Minas, photographié à bord du *Marion Dufresne* en 1977.

Cet homme pour qui l'oxygène n'avait plus de secret c'était Hans Joachim Minas qui, mieux que quiconque, décryptait dans les concentrations qu'il observait la part qui provenait d'échanges physiques avec l'atmosphère ou entre deux masses d'eau et ce qui était dû à des processus biologiques le consommant (respiration) ou le produisant (photosynthèse). Examinons la manière dont il a ainsi abordé la situation en mer Ligure où les basses pressions atmosphériques relatives engendrent, toute l'année, un système cyclonique (dans le sens contraire des aiguilles d'une montre) de vents qui, eux-mêmes, provoquent une circulation superficielle dans le même sens. Quelques océanographes estiment en fait que les vents interviendraient peu ; ce serait le mélange hivernal qui expliquerait cette circulation. Les eaux légères du courant atlantique sont chassées à la périphérie, ce qui provoque un mouvement compensateur de divergence des eaux profondes au centre. En dehors de la période de mélange hivernal qui rompt cette structure, la distribution des caractéristiques physiques et chimiques souligne cette structure en dôme. S'il faut atteindre 150 mètres de profondeur à la côte pour rencontrer l'isoplèthe (ligne virtuelle joignant les points présentant la même concentration d'un sel nutritif) 0,15 micromoles de phosphate (2 micromoles pour le nitrate), ces valeurs se rencontrent entre 50 et 75 mètres au centre de la divergence.

Cette situation permit à Minas (1970) d'estimer la production primaire estivale au point de mouillage de la bouée-laboratoire (Figure 41) de manière élégante à partir du bilan d'oxygène libéré par la photosynthèse et piégé sous la thermocline (figure 42, gauche). Avec les spécialistes de production primaire, la bouée fut principalement utilisée par les physiciens, notamment José Gonella qui y fit des mesures de courants à différentes profondeurs (Gonella, 1968). Cette mesure n'était pas simple car la bouée, ancrée par un câble de mouillage de 3 600 mètres n'était pas fixe avec un rayon d'évitage d'environ 500 mètres. À chaque im-

mersion des courantomètres, il fallait déterminer la vitesse de déplacement de la bouée à l'intérieur du cercle d'évitage grâce à une chaîne de radionavigation Rana avec deux stations à San Remo et à Saint-Tropez. Mais revenons aux diagramme obtenus par Minas et qui relie la température à l'oxygène, les points se distribuent suivant deux directions principales :



42 Utilisation des teneurs en oxygène en Méditerranée en été.

(gauche) Variations de certaines caractéristiques physiques et chimiques en fonction de la profondeur à la bouée-laboratoire en juin 1964 durant une dizaine de jours. La thermocline, installée précocement piège l'oxygène photosynthétique qui atteint 6,3 millilitres par litre. Notons que une année plus tard, il n'y a pas eu de piégeage, la teneur en oxygène restant bien plus basse.

(droite) La prise en compte de mélanges entre masses d'eau et d'advections permet, dans des circonstances favorables, d'établir les parts respectives des processus physiques et biologiques dans les échanges d'oxygène entre océan et atmosphère (en millilitres par litre). D'après Minas (1970), redessiné.

- la droite AB souligne la corrélation négative entre ces deux facteurs pour des températures $> 15^\circ\text{C}$. AB se situe toujours à droite de la courbe de saturation, ce qui montre l'état de sursaturation permanente de la couche superficielle. La sursaturation augmente quand la température baisse entre 23 et 15°C ; aussi la pente AB est-elle inférieure à la pente de saturation à 100 % d'oxygène ;
- la portion de courbe BC présente une pente positive entre 15 et $13,5^\circ\text{C}$ environ ; la température diminue en même temps que la concentration en oxygène en fonction de la profondeur. Le point d'inversion B représente la valeur maximale d'oxygène correspondant approximativement à 15°C . Nous délaissions la partie CDE, droite de mélange entre l'eau intermédiaire (point E) légèrement plus chaude et l'eau d'hiver (D), car les processus biologiques n'interviennent pas. Les données de 1964 à la bouée-laboratoire, mouillée au sud de Nice, permirent à Minas de calculer la part de la production primaire et des processus physiques dans les échanges gazeux d'oxygène entre l'océan et l'atmosphère (figure 42, droite). Mon équipe a imité son approche en étudiant ce qui se passait de part et d'autre de la thermocline estivale au large de Banyuls.