

Le Picoplancton

Hubert-Jean CECCALDI

18 Avril 2013

Mes chers confrères et consoeurs, chers amis.

Le but de cette communication est de vous transmettre des informations précises sur de récentes découvertes réalisées au cours de ces toutes dernières années dans le domaine de l'Océanographie biologique. Il s'agit d'importants résultats d'études réalisées sur des formes vivantes microscopiques de très petites dimensions, constituant une fraction particulière du plancton existant dans tous les océans: le **picoplancton**, dont on découvre chaque jour la grande importance.

En guise d'introduction, en particulier pour nos confrères et consoeurs non scientifiques, il est important de re-définir ce qu'est l'**océanographie biologique**, et également ce qu'est le **plancton**, puisque le picoplancton en fait évidemment partie.

J'exposerai ensuite quelles sont les méthodes d'étude du picoplancton, puis quelles sont à la fois l'importance et les caractéristiques étonnantes de ces organismes, et je terminerai par quelques inattendues perspectives qui s'ouvrent à la suite des découvertes récentes obtenues dans ce domaine.

Océanographie biologique

L'objet de l'Océanographie biologique consiste à mieux connaître le milieu marin surtout dans ses caractères biologiques et écologiques, alors qu'au début des recherches scientifiques consacrées aux océans, ces études n'étaient surtout cantonnées qu'aux seules disciplines physiques et chimiques - disciplines qui ont d'ailleurs toujours leurs spécialistes.

L'océanographie biologique est donc essentiellement pluridisciplinaire. Son très vaste champ de recherche intègre les aspects physiques (par exemple température, densité, courants, bulles, turbulences, couleurs de l'Océan, etc.), et chimiques (par exemple salinité, oligo-éléments, molécules dissoutes, gaz et substances biologiques actives, etc.) mais elle est devenue au cours du temps beaucoup plus biologique, en s'intéressant de façon très approfondie aux organismes vivants dans les zones littorales et dans les océans, ainsi qu'à leurs rapports avec le milieu minéral et le milieu liquide.

L'océanographie biologique se consacre donc de façon principale à l'étude des organismes vivants, qui occupent, en mer, différents milieux et à différentes échelles de taille. Sur un plan plus général, elle inclut aussi l'étude de la production de produits constitués principalement de carbone assimilable par les organismes vivants, la biologie marine, les caractères et la dynamique des écosystèmes, les cycles globaux de bio-géochimie ou encore leur modélisation théorique par exemple.

Elle tente aussi de comprendre les interactions entre les divers organismes et l'influence

des processus physiques et chimiques du milieu marin non seulement à l'échelle individuelle mais aussi à l'échelle des groupements et des populations des organismes vivants. Pour l'océanographie biologique, la vie marine est souvent perçue comme une suite de chaînes alimentaires, une intégration de réseaux trophiques, depuis les formes vivantes végétales qui synthétisent la matière organique assimilable, jusqu'à l'ensemble des consommateurs qui profitent de cette manne que la nature a toujours fournie. Elle constitue essentiellement la base de toute vie marine.

L'un des grands défis de notre monde contemporain est de quantifier le mieux possible les populations des êtres vivants, leur évolution, leurs compositions en divers éléments (carbone, azote, oxygène, éléments métalliques, etc.), en leurs constituants (protéines, lipides, glucides, etc.) en divers gaz, en particulier les gaz dissous et leurs échanges avec les constituants de l'atmosphère.

Cette quantification est primordiale, aussi bien au plan théorique que pratique : la production primaire de la planète est estimée entre 70 et 130 Gt C/an (gigatonnes de carbone organique par an) et il importe de savoir comment et de combien les activités humaines peuvent la perturber.

La part de la production marine a longtemps été considérée comme ne représentant que le tiers de la production primaire totale, alors que l'océan représente les 2/3 de la surface de la planète.

Mais au cours de ces dernières années, les évaluations quantitatives ont été reconsidérées en forte hausse par la prise en compte du pico-plancton (éléments vivants dont la taille est inférieure à 2 µm), dont l'importance avait été largement sous-estimée jusqu'ici.

Plancton

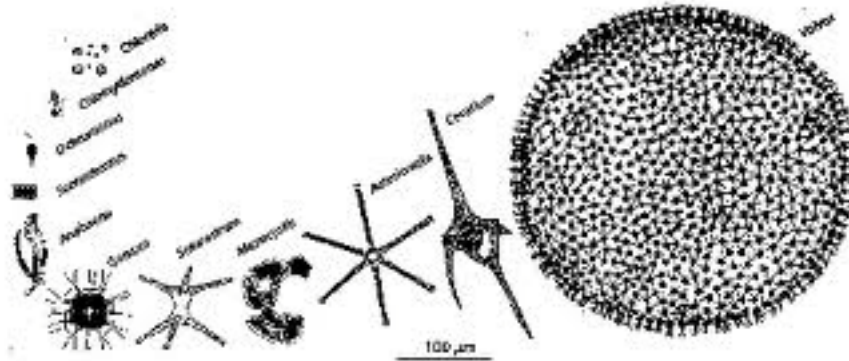
On admet généralement que les êtres qui se trouvent dans le milieu marin se subdivisent en trois grands groupes : le **plancton** (c'est-à-dire les végétaux et les animaux vivant en suspension ou en dérive passive dans le milieu liquide (du grec « pelagos » = de la colonne d'eau), le **necton** (animaux pélagiques vivant sans contact avec les fonds et bons nageurs) et le **benthos** (animaux et végétaux vivant en relation étroite avec les fonds ou fixés sur les substrats, du grec « benthos » = fond). Le plancton appartient donc au monde pélagique avec le necton (poissons, cétacés, céphalopodes, etc.) et s'oppose au monde benthique, qui, lui, est fortement inféodé au fond des mers.

Les organismes du plancton sont le plus souvent classés selon leur taille. De façon pragmatique, voire artificielle, leur différenciation est liée aux moyens employés pour les récolter, par exemple les différents types de filets ou de filtres utilisés pour les capturer et les recueillir :

- * mégaplancton : 20 - 200 cm (exemples: grosses méduses, colonies de salpes)
- * macroplancton : 2 - 20 cm (alevins, siphonophores, salpes, cténaires)
- * mésoplancton : 0,2 mm - 2 cm (larves de crustacés et de poissons)
- * microplancton : 20 - 200 µm (Diatomées, Copépodes)
- * nanoplancton : 2 - 20 µm (Dinoflagellés, Chlorophycées)

- * picoplancton : 0,2 - 2 μm (bactéries, eucaryotes de petite taille et microorganismes)
- * femtoplancton : <0,2 μm (essentiellement des virus)

Les différentes tailles des organismes du plancton :



Un autre aspect majeur mérite d'être souligné: le plancton désigne des organismes vivants aquatiques ayant des déplacements nuls ou négligeables par rapport aux mouvements des masses d'eau dans lesquelles ils vivent. Ils sont donc forcés de dériver au gré des courants, si faibles soient-ils.

Le critère primordial est donc la locomotion et non la taille des organismes, bien que la majorité d'entre eux soient microscopiques ; les méduses, par exemple, même énormes, appartiennent au plancton !

Le plancton est localisé à toutes les profondeurs dans la colonne d'eau, mais on le trouve généralement en plus grande abondance dans les premiers mètres sous la surface (zone **photique** ou **euphotique**, celle où pénètre aisément la lumière et se produit la photosynthèse, d'une centaine de mètres d'épaisseur environ).

A côté du plancton vivant, on trouve, en suspension dans l'eau, de la matière organique sous forme de particules de compositions et de tailles très variées (protéines, polysaccharides, débris végétaux ou animaux, etc.) qui constituent le **seston**. Les éléments d'origine minérale, comme les argiles par exemple, constituent le **tripton**. Les premières observations effectuées en plongée profonde ou en bathyscaphe l'avaient désigné comme la "neige" de la mer. Cette sédimentation est continue et elle enrichit les fonds marins.

La connaissance du bilan global et des cycles de cette matière organique, en relation avec le milieu marin et les êtres vivants qui s'y trouvent, constitue donc l'objet d'étude majeur de l'**Océanographie biologique**.

Si les organismes du plancton sont généralement de petite taille, leur nombre est si considérable qu'ils représentent l'une des fractions majeures du cycle de la matière organique de la planète. Leur présence peut même être détectée et mesurée quantitativement par des capteurs embarqués sur des satellites; en effet, leur présence est généralement associée à des algues microscopiques nécessairement pourvues de **pigments photosynthétiques** (chlorophylles, caroténoïdes, phycobiliprotéines, etc.), dont les couleurs se différencient du bleu de l'eau de la mer.

On a pu ainsi localiser de façon assez précise des zones de très forte production biologique marine en raison de remontées d'eaux profondes riches en sels minéraux (nitrates, phosphates, silicates, etc.) nécessaires à la croissance des algues, base de toutes les chaînes alimentaires marines. En fait, on considère maintenant, de façon à la fois plus exacte et plus complète, des "**réseaux trophiques**", qui rendent mieux compte de la complexité des relations entre constituants, vivants ou non, qui se trouvent les océans.

Sur la planète, quatre zones majeures de remontées d'eaux profondes dans les aires marines proches de la surface - où pénètre la lumière et où se produit la photosynthèse - ont été identifiées au large de la Californie, au large du Pérou-Chili, au large de la Mauritanie et au large de la Namibie. On les appelle **résurgences marines** ou **remontées d'eaux froides**, ou "**upwellings**".

Les réseaux trophiques marins sont très complexes. Leur étude a montré qu'ils étaient constitués de plusieurs niveaux, depuis les algues microscopiques, photosynthétiques, à l'origine du réseau, en passant par les consommateurs de végétaux, puis les carnivores de premier ordre et les prédateurs situés en haut du réseau trophique - dont l'Homme -. On estime globalement que pour obtenir 100 g. de chair de poisson, il fallait une tonne de phytoplancton, c'est-à-dire d'algues microscopiques comme les diatomées, les flagellés, les euglènes, les coccolithophorides, etc.

L'étude des différents groupes du plancton est passionnante et elle a donné lieu à d'innombrables travaux de recherche qui ont pour premier but d'en connaître les composants, et d'autre part, de comprendre l'importance écologique du plancton dans les milieux aquatiques. Historiquement, les recherches taxonomiques puis descriptives des formes de petite taille ont été directement liées à l'emploi du microscope optique, puis, plus récemment, du microscope électronique, pour les formes de plus en plus petites. Les premières descriptions scientifiques ne datent guère que du XIX^e siècle. Mais dans un milieu mouvant comme le milieu marin, la diversité planctonique est très importante et variable à la fois dans le temps et l'espace. De ce fait, de nouvelles espèces sont décrites de façon presque continue, non seulement dans des zones marines lointaines, mais dans nos propres mers.

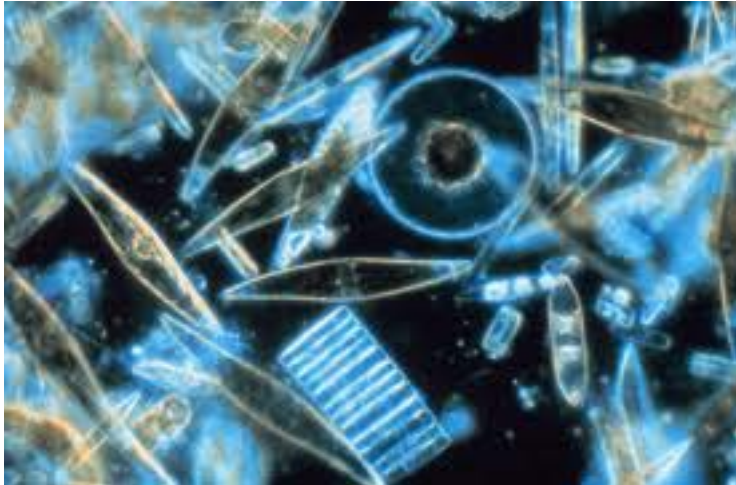
Constituants du plancton

On distingue le plus généralement deux grands groupes principaux: le phytoplancton et le zooplancton. Toutefois, la discrimination entre les deux groupes est parfois difficile et controversée chez les formes de très petite taille. Ainsi, les cyanobactéries sont généralement classées avec le phytoplancton car ce sont des bactéries photosynthétiques (bactérioplancton). De même, certains dinoflagellés sont photosynthétiques. D'autres espèces, très proches, sont hétérotrophes; enfin, d'autres espèces sont mixotrophes, c'est-à-dire capables de consommer des proies mais aussi de réaliser des activités de photosynthèse. Il existe donc, en complément des "classiques" phytoplancton et zooplancton, d'autres organismes planctoniques, à savoir de nombreuses bactéries et des virus.

Phytoplancton

Le terme de phytoplancton désigne l'ensemble des microalgues présentes dans la colonne d'eau, ou plus largement des organismes autotrophes photosynthétiques présents dans la colonne d'eau (si on inclut les cyanobactéries). Ce sont des microalgues planctoniques unicellulaires,

vivant le plus souvent isolées, parfois associées en chaînes ou en colonies. Elles se multiplient par mitoses, et/ou parfois par reproduction sexuée (chez les diatomées par exemple). On les retrouve majoritairement dans la zone euphotique où elles effectuent la base de la matière organique consommable. Dans ce groupe, on retrouve plusieurs taxons, dont les principaux sont : Chlorophycées, Diatomées, Dinoflagellés photosynthétiques, Rhodophycées, Euglénophycées, Prasinophycées, Dictyochophycées, Cyanobactéries ...



Nous ne détaillerons pas chacun de ces groupes, qui possèdent souvent des caractéristiques et des propriétés très remarquables.

Zooplancton

Le zooplancton désigne l'ensemble des animaux hétérotrophes, c'est-à-dire qui se nourrissent d'algues ou de proies, unicellulaires et pluricellulaires, dérivant au gré des courants. Dans le zooplancton, certains animaux sont planctoniques tout au long de leur vie, on parle de plancton permanent ou **holoplancton**. D'autres sont planctoniques uniquement pendant une partie de leur vie, et on parle alors de plancton temporaire ou de **méropiancton**.

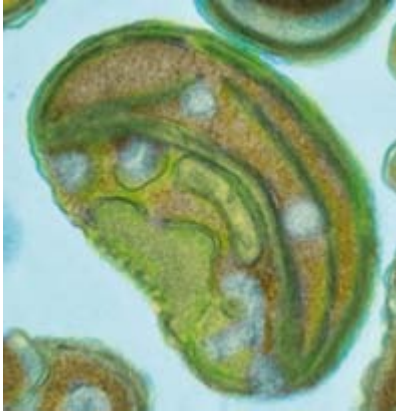
De très nombreux groupes animaux sont représentés dans le plancton: crustacés, mollusques, annélides, cnidaires, cténaires, chordés, protozoaires, pour ne citer que les principaux groupes. Une grande partie des stades larvaires d'espèces benthiques ont des formes larvaires nageuses, qui appartiennent donc, de façon temporaire, au plancton.

Le plancton est un constituant absolument essentiel des écosystèmes aquatiques : il constitue les premiers éléments des réseaux trophiques avec le phytoplancton producteur d'oxygène, et surtout parce que les premiers stades de la plupart des animaux aquatiques ont un mode de vie planctonique.

Protozoaires et rotifères

On peut parfois différencier les protozoaires et les rotifères à côté du phytoplancton et du zooplancton, car certains d'entre eux peuvent être autotrophes ou hétérotrophes. Ce sont des organismes unicellulaires (protozoaires) ou pluricellulaires à nombre limité de cellules (rotifères) dont toutes les étapes du cycle biologique n'ont jamais aucun contact avec le fond. On peut trouver des formes très variées: rotifères, tintinnidés, dinoflagellés hétérotrophes, foraminifères,

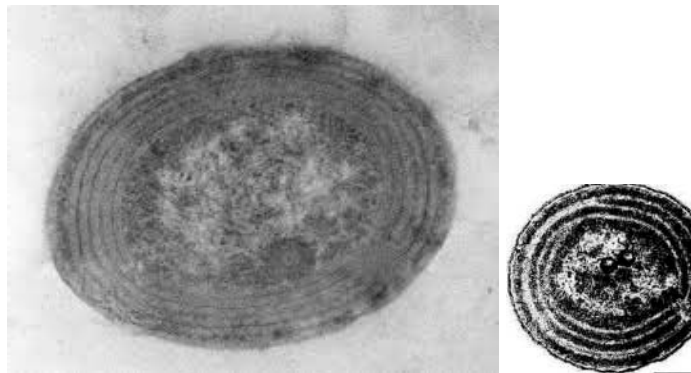
radiolaires, acanthaires, etc.



Picoplancton

Le picoplancton regroupe les espèces de très (très) petite taille vivant en suspension dans les eaux naturelles, dont les dimensions sont comprises entre 0,2 et 2 μm (microns). Il est composé notamment de bactéries, de cyanobactéries, d'algues, de protozoaires et certains autres groupes microscopiques. Le picoplancton est omniprésent dans les eaux douces ou salées des lacs et des mers. On estime, depuis peu, que leur biomasse totale est plus importante que tous les autres groupes d'organismes pélagiques. C'est là un résultat très considérable.

Leur taille extrêmement petite les avait fait échapper, jusqu'ici, à la vigilance des observateurs. En effet, ces formes minuscules passaient au travers des filtres, dont les pores étaient surtout définis pour retenir surtout les diatomées et les flagellés. Or leurs dimensions varient d'une taille de quelques microns jusqu'à plus d'un millimètre (1000 μm) pour les plus grandes. Leur taille moyenne est de l'ordre de 25 à 70 μm .



Si l'observation détaillée des diatomées - et des protozoaires aquatiques - est déjà difficile, en raison de leurs très faibles dimensions, l'étude des constituants du picoplancton est encore plus difficile. Les structures de ces formes vivantes ayant ces tailles extrêmement faibles sont très simples. Il n'est pas étonnant que ces organismes aient échappé à l'observation directe lors de l'examen d'eau de mer après filtration. Leur observation n'est devenue possible qu'à l'aide de microscopes optiques (grossissement de 100 à 1000 fois) ou de microscopes électroniques à

balayage ou à transmission et mieux encore, à des microscopes à force atomique, après préparations spéciales.

Les constituants du picoplancton ont longtemps été assimilés à de minuscules débris organiques ou des contenus cellulaires provenant de différentes espèces du phytoplancton. La vraie description de la première espèce réellement picoplanctonique date de 1952. En effet, la publication de l'espèce *Chromulina pusilla*, pourtant l'une des plus abondantes dans les milieux côtiers tempérés, décrite par Butcher, passa presque inaperçue. Jusqu'ici, on concevait que les formes les plus petites des réseaux trophiques marins étaient constitués, au dessous des tailles des cellules du phytoplancton, par les bactéries aquatiques.

Ce n'est qu'en 1979 que Waterbury confirma l'existence de picoplancton, en annonçant la découverte d'une autre espèce abondante: *Synechococcus*, bientôt décrite au microscope électronique par Johnson et Sieburth. C'est à partir de 1982 que l'importance de minuscules eucaryotes (organismes possédant un noyau) fut mise en évidence par microscopie électronique. La communauté scientifique réalisa alors qu'une fraction très importante de la production primaire océanique était attribuable à des organismes d'une taille inférieure à 2 microns.

En 1992, la découverte des « Prochlorophytes » par Chisholm et Olson, dans la mer des Sargasses, a été réalisée à partir d'observations nouvelles sur des espèces proches de *Prochlorococcus marinus*.

La France n'est pas en reste dans ce domaine nouveau. Le plus petit eucaryote photosynthétique connu, *Ostreococcus tauri*, algue verte unicellulaire de 0,8 µm, a été découvert par Courties ainsi que par Chrétiennot-Dinet et al., dans l'étang de Thau en 1994. A Roscoff, une équipe de l'Université Paris VI, dirigée par Daniel Vaultot a effectué de très belles études sur ces nouvelles populations. Au Japon, un jeune chercheur français, Mathias Girault, a récemment terminé (2014) des travaux au large des côtes de Nouvelle-Guinée, et a identifié, avec une équipe (à laquelle est associé l'auteur de cette communication) du Centre universitaire de Luminy à Marseille dirigée par Gérard Grégori, de nouvelles caractéristiques des peuplements picoplanctoniques de l'Océan indien.

Il faut dire que le thème est assez neuf, et presque chaque campagne en mer apporte sa récolte de nouveautés minuscules: nouvelles espèces, nouveaux genres, nouvelles classes parfois, dans les trois grandes divisions du monde vivant: bactéries, archéobactéries et organismes eucaryotes, c'est-à-dire les espèces pourvues d'un noyau, où se trouve l'ADN.

Difficultés de l'étude du picoplancton

La difficulté première est la taille vraiment très faible des éléments du picoplancton. Certaines de ces formes sont à peine visibles aux microscopes électroniques classiques.

Une autre difficulté est leur identification. On ne connaît pas la nature de ces organismes vivants. Sont-ils d'affinité animale ou végétale ou encore bactérienne ? Quelle est la part des micro-bactéries, des micro-protozoaires, des cyanobactéries pourvues de pigments bleus phycobiliprotéiques, des micro-algues et de quel grand groupe botanique ?

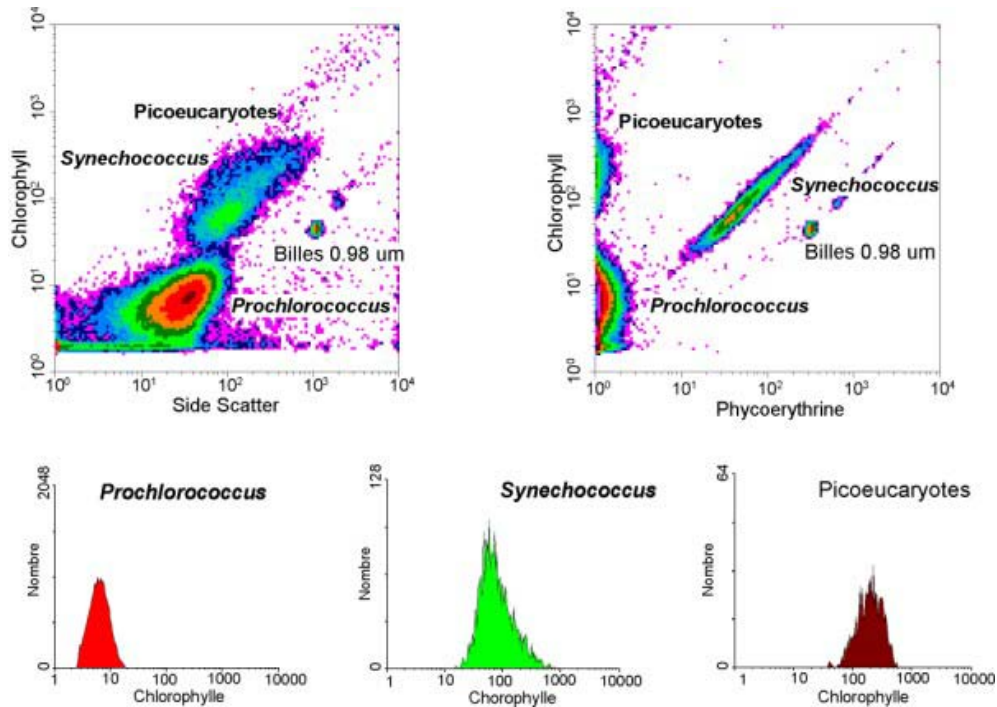
Et c'est là que se situe l'une des difficultés majeures de l'identification. Leurs formes sont si simples que l'on ne peut pas s'appuyer sur des caractères morphologiques pour pouvoir différencier leur appartenance systématique. Une grande partie d'entre eux ne possèdent pas de noyau, où, de façon classique, est empaqueté l'ADN, porteur des caractères héréditaires. Les chercheurs qui se consacrent à leur étude utilisent alors une identification par des techniques de biologie moléculaire: séquençage de l'ARN ribosomal, qui contrôle la synthèse des protéines dans chacun de ces organismes marins.

Une autre grande difficulté de leur étude réside dans le fait que la très grande majorité de ces organismes récoltés ne peuvent pas être cultivés, comme on sait le faire pour de nombreuses diatomées. On ne connaît donc encore rien de leur cycle biologique.

Aujourd'hui, plusieurs équipes européennes mettent simultanément en évidence la grande diversité du picoplancton eucaryote, c'est-à-dire les espèces possédant des noyaux. Mais pour toutes les espèces qui ne possèdent pas de noyau - et elles sont nombreuses - une autre approche a été mise au point pour identifier les différentes espèces constituant le picoplancton. Elle est utilisée dans plusieurs laboratoires qui réalisent des analyses de picoplancton par cytométrie en flux.

Un cytomètre en flux est un analyseur-trieur de particules ou de cellules vivantes ou mortes, équipé généralement d'un laser Argon. Les éléments du picoplancton sont éclairés à l'aide d'une lumière monochromatique bleue, dont la raie d'excitation est à 488 nm (260 mW) afin d'exciter les cellules. La lumière du laser est diffusée à 90 degrés et on mesure les rayonnements fluorescents réémis par les pigments des organismes étudiés. Trois fluorescences différentes sont ainsi collectées :

- la fluorescence verte émise par les particules est collectée sur 530/540 nm ;
- la fluorescence orange, en relation avec la teneur en un pigment fluorescent la phycoérythrine, sur 575/580 nm ;
- la fluorescence rouge, en relation avec la teneur en chlorophylle est collectée sur 640 nm.



Les techniques actuelles, en pleine évolution, permettent de séparer plusieurs milliers d'organismes à la seconde.

Cyanobactéries

On notera que les cyanobactéries sont des organismes procaryotes mixotrophes ne possédant ni noyau individualisé, ni plaste, et qu'elles n'ont aucune reproduction sexuée. De plus, les cyanobactéries sont dépourvues des éléments habituels que l'on trouve dans toutes les cellules étudiées: pas de membrane nucléaire, pas de mitochondries, pas de réticulum endoplasmique, pas de chromosomes, pas de flagelles. La chlorophylle est contenue dans la zone périphérique où elle assure la photosynthèse, la respiration et la fixation de l'azote, chez certaines espèces. Au centre de la cellule, on trouve de l'ADN, non pas dans un noyau, mais qui se présente sous forme de filaments ou d'aiguilles. Il assure, par des processus encore mal connus, la synthèse protéique de l'organisme considéré.

Les pigments des cyanobactéries sont très variés: elles possèdent évidemment de la chlorophylle mais aussi de nombreux autres pigments, qui peuvent leur donner des colorations fort variées: orangé, bleu, violet, dorée, etc.

Prochlorophytes

Les Prochlorophytes, comme *Prochlorococcus marinus*, très abondantes dans le picoplancton, ont des tailles beaucoup plus petites que les cyanobactéries. On les trouve très fréquemment dans les eaux marines à tous les niveaux. Comme pour d'autres groupes du picoplancton, la position taxonomique des Prochlorophytes n'est pas encore clairement fixée. Ces nano-algues autotrophes (les plus petites connues) ne contiennent pas de chlorophylle a, mais de la divinyl-chlorophylle. Leur croissance est très lente et leur durée de vie très longue.

Prochlorococcus a une très large distribution entre les latitudes de 40°N et 40°S, à des densités de l'ordre de 100 000 éléments par millilitre. On ne la trouve plus aux latitudes plus

élevées, peut-être en raison de températures trop basses.

Virus marins

Ils participent à la composition du picoplancton. Ils représentent une biomasse évaluée à 200 millions de tonnes de carbone, ce qui fait d'eux les organismes les plus nombreux dans les océans (Suttle 2005). Une meilleure connaissance du rôle du **virio**plancton est essentielle à une meilleure connaissance de grands cycles biogéochimiques. Très peu de choses sont connues à l'heure actuelle sur les virus marins. Un virus est généralement spécifique d'une cellule hôte donnée. Il est donc caractéristique d'une espèce. Ainsi, certains virus s'attaquent spécifiquement aux procaryotes, aux cyanobactéries, et d'autres, à différentes espèces marines. On sait aujourd'hui que les Bactéries et les Archéobactéries (Archées, voir plus bas) sont les cellules les plus abondantes dans les écosystèmes aquatiques ; il est donc admis que la majeure partie de la communauté virale est composée de bactériophages.

Les virus sont des acteurs majeurs de la régulation des populations phytoplanctoniques.

Archées

Les archées, ou Archaea, sont encore appelées archéobactéries. Elles sont beaucoup plus simples que les bactéries ordinaires. Elles sont évidemment constituées d'une cellule unique, sans noyau, sans organites. Comme leur apparence est proche de celle des bactéries classiques, on les a pendant longtemps assimilées à des bactéries particulières pouvant vivre dans des conditions extrêmes (sources chaudes, résurgences hydrothermales océaniques, lacs salés, suintements volcaniques, par exemple).

En se basant sur des résultats d'études en biologie moléculaire, une nouvelle phylogénie a été établie et les archées sont aujourd'hui considérées comme différentes des vraies bactéries. Leur présence extrêmement abondante dans le milieu marin, dans des flores intestinales, dans des zones marécageuses humides ont fait modifier ce point de vue.

Conclusions et perspectives

On voit combien ces études récentes sur des formes vivantes de taille extrêmement petite ont modifié les façons de considérer les cycles biologiques marins, en particulier dans le plancton. Elles ont apporté des notions très nouvelles et très originales en océanographie biologique, que ce soit en productivité marine, car leur taux de reproduction est très rapide, en production marine, en raison de leur nombre quasi incommensurable, en écologie marine et dans les analyses des écosystèmes marins

Des découvertes de nouvelles fonctions biologiques liées à certaines conditions extrêmes sont en cours de mise à jour: métabolisme du soufre, rôles des espèces hyperthermophiles, vie sous très hautes pressions et sous très fortes salinités.

Des divisions nouvelles dans la classification des êtres vivants ont été mises en évidence par la considération de groupes majeurs: les Archées, les Eubactéries, les Eucaryotes, les virus, bien que le cas de ces derniers puisse être considéré de façon disjointe.

Les nouvelles techniques de biologie moléculaire ont conduit à des découvertes de nouveaux génomes. Les techniques de nano-technologie ont permis de nouvelles observations

dans ce domaine. L'immensité des données d'observation de ces formes minuscules obligera à l'emploi de techniques informatiques nouvelles, que l'on désigne sous le terme général de big data et dont l'étude commence à peine.

Les mécanismes de production d'oxygène, le rejet de cet oxygène sous forme de nanobulles, et la synthèse de matière organique nouvelle par des organismes de si petite taille, constituent autant de phénomènes encore très mal connus.

Enfin, au point de vue des mécanismes intimes de l'évolution cellulaire, on considère que certaines formes chlorophylliennes du picoplancton ont pu donner des organites (ou organelles) intercellulaires comme les chloroplastes chez les végétaux, grâce à des mécanismes évolutifs encore inconnus d'endosymbiose, à l'instar de ce qui s'est produit pour les mitochondries, qui doivent provenir de certaines bactéries. Ces remarques renforcent les hypothèses des emboîtements successifs de la matière vivante, comme l'un des moteurs majeurs de l'évolution de la matière vivante.

Il nous reste à prendre réellement conscience des échelles auxquelles ces mécanismes vitaux fondamentaux se manifestent dans toutes les branches des êtres vivants, y compris chez l'homme, c'est-à-dire chacun d'entre nous.