

évaluer. Il y a encore cinq ans environ, la plupart des biologistes sous-estimaient notablement la quantité de carbone fixée par le phytoplancton, faisant la part trop belle aux plantes terrestres. Au cours de la seconde moitié du XX^e siècle, les biologistes océanographes ont réalisé des milliers de mesures de la productivité du phytoplancton. Cependant ces mesures, faites à des périodes de l'année différentes, étaient si éparpillées à la surface des océans que l'on ne pouvait pas en déduire, même avec l'aide de modèles mathématiques, une estimation fiable de la productivité globale.

Le suivi satellitaire du phytoplancton

La situation a changé en 1997, quand la NASA lança le satellite SeaWiFS, le premier satellite capable de suivre, semaine après semaine, l'évolution du phytoplancton de tous les océans. On distingue ces micro-organismes, grâce au fait que la photosynthèse qui libère l'oxygène ne fonctionne qu'avec la chlorophylle *a*. Ce pigment et d'autres absorbent les longueurs d'onde bleue et verte de la lumière solaire, tandis que les molécules d'eau les diffusent : plus une région de l'océan observée de l'espace paraît sombre, plus elle

contient de phytoplancton. Une simple mesure du rapport entre la lumière bleu-vert émise par cette zone et la lumière totale permet de quantifier la chlorophylle et, par conséquent, le phytoplancton.

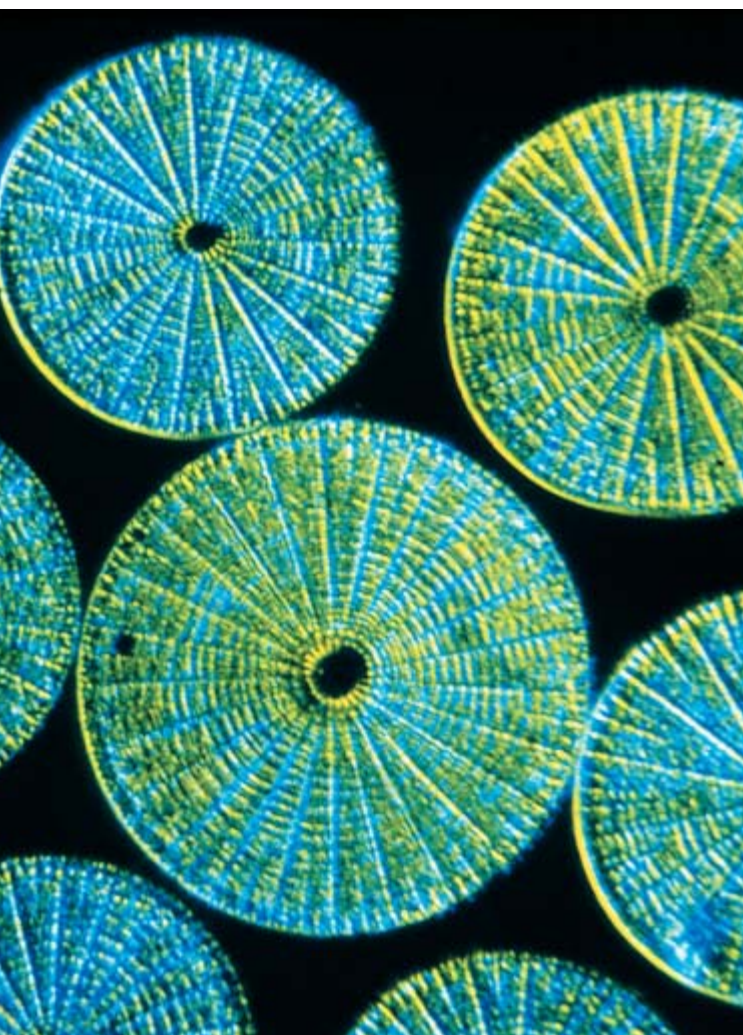
Les images obtenues par satellite de la chlorophylle ainsi que les milliers de mesures de la productivité du phytoplancton ont notablement amélioré les estimations de la productivité primaire totale des océans fournies par les modèles mathématiques. Bien que les diverses équipes aient utilisé des modèles différents, elles sont toutes parvenues, en 1998, à la même conclusion étonnante : chaque année, le phytoplancton incorpore approximativement 45 à 50 milliards de tonnes de carbone inorganique – presque le double des estimations antérieures.

En 1998, avec mes collègues Christopher Field et James Randerson, de l'Institut Carnegie de Washington, et Michael Behrenfeld, de l'Université de Rutgers, nous avons comparé ce chiffre avec celui de la production primaire des plantes terrestres obtenue grâce aux images satellites. On admettait, selon d'anciennes estimations, que les plantes terrestres assimileraient jusqu'à 100 milliards de tonnes de carbone inorganique par an. À la surprise de nombreux écologistes, notre analyse a révélé qu'elles n'en assimilent qu'environ 52 milliards de tonnes. En d'autres termes, le phytoplancton absorbe presque autant de dioxyde de carbone de l'atmosphère et des océans, par photosynthèse, que ne le font les arbres, les herbes et toutes les autres plantes terrestres.

En découvrant que le phytoplancton est deux fois plus productif qu'ils ne le pensaient auparavant, les biologistes ont reconsidéré l'importance des restes de phytoplancton dans le cycle du carbone et du dioxyde de carbone. Comme le phytoplancton utilise toute l'énergie solaire qu'il reçoit pour se développer et se reproduire, son cycle de vie est court : la population marine se renouvelle entièrement chaque semaine. Au contraire, les plantes terrestres dépensent une part importante de l'énergie solaire dans la fabrication de bois, de feuilles et de racines, et vivent en moyenne 20 ans. Lorsque les cellules de phytoplancton se divisent – tous les six jours en moyenne – la moitié des cellules filles meurent ou sont ingérées par le zooplancton, des micro-organismes dont se nourrissent les crevettes, les poissons et les grands carnivores.

La capacité du phytoplancton à influencer sur le climat tient à la brièveté de son cycle de vie. À la fin des années 1980, après avoir pris conscience de ce phénomène, on a lancé un programme international de recherche, le JGOFS, dont l'objet est l'étude des flux océaniques globaux. Dès 1988, les scientifiques du JGOFS ont commencé à quantifier le cycle océanique du carbone. Ce cycle commence par le phytoplancton et les animaux qui le consomment : la matière organique des cellules de phytoplancton mort et des matières fécales animales coulent et sont absorbées par des micro-organismes qui la reconvertissent en nutriments inorganiques, notamment en dioxyde de carbone. Ce recyclage se déroule en grande partie dans la couche de l'océan où pénètre la lumière du Soleil et où ont lieu les échanges gazeux entre l'atmosphère et l'eau. Le dioxyde de carbone atmosphérique se dissout dans la couche d'eau superficielle : une partie est utilisée pour la photosynthèse et une partie repasse dans l'atmosphère (il faut environ six ans pour que la totalité des gaz de l'atmosphère s'échange avec les gaz dissous dans la couche supérieure de l'océan).

C'est surtout la matière organique qui sombre au fond de l'océan avant de se désagréger qui influe sur le climat.



2. LES DIATOMÉES sont les géants du monde phytoplanctonique. Ici, l'espèce *Actinocyclus sp.* mesure jusqu'à un millimètre de diamètre.

Quand il est libéré au-dessous de 200 mètres de profondeur, le dioxyde de carbone stagne longtemps, car la température froide et la densité élevée de l'eau l'empêchent de se mélanger avec les eaux supérieures, plus chaudes. Par ce mécanisme de «pompe biologique», le phytoplancton extrait le dioxyde de carbone des eaux de surface et le stocke dans l'océan profond. En 2001, avec Edward Laws, de l'Université d'Hawaï, et trois membres du JGOFS, nous avons évalué à près de huit milliards de tonnes la quantité de carbone ainsi transférée dans les eaux profondes, soit 15 pour cent du carbone que le phytoplancton assimile chaque année.

En quelques centaines d'années, la quasi-totalité des nutriments relâchés en mer profonde remontent en surface en raison des courants ascendants, notamment le long des côtes, et ils y stimulent à nouveau la croissance du phytoplancton. Ce cycle assure l'équilibre de la pompe biologique : la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone est environ 200 parties par million inférieure à ce qu'elle serait en l'absence de ce mécanisme. Cette réduction est notable étant donné que la concentration actuelle en dioxyde de carbone est d'environ 365 parties par million.

La pompe biologique

Toutefois, à l'échelle de millions d'années, la pompe biologique «fuit». Environ un demi à un pour cent des cellules mortes du phytoplancton et de la matière fécale se déposent sur les fonds marins avant d'être recyclés dans l'océan supérieur. Une partie de ce carbone est incorporé dans des roches sédimentaires, tels les schistes noirs, le plus grand réservoir de matière organique de la planète. Une toute petite partie est incorporée dans les dépôts de pétrole et de gaz naturel ; le carburant des voitures n'est rien d'autre que des restes fossilisés de phytoplancton.

Comment le carbone des schistes et des autres roches retourne-t-il dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone ? Les roches qui le contiennent s'enfoncent d'abord dans les profondeurs de la Terre, dans les zones de subduction. Là, la chaleur et la pression extrêmes font fondre les roches ; les gaz piégés sont libérés et expulsés dans l'atmosphère lors des éruptions volcaniques.

En brûlant les combustibles fossiles, on remet en circulation le carbone piégé environ un million de fois plus vite que ne le font les volcans. Comme les forêts et le phytoplancton ne peuvent absorber le dioxyde de carbone assez vite pour compenser les émissions anthropiques, les concentrations atmosphériques de ce gaz à effet de serre ont augmenté depuis le début de l'ère industrielle. La tendance au réchauffement global observée depuis une cinquantaine d'années est vraisemblablement liée à cette augmentation.

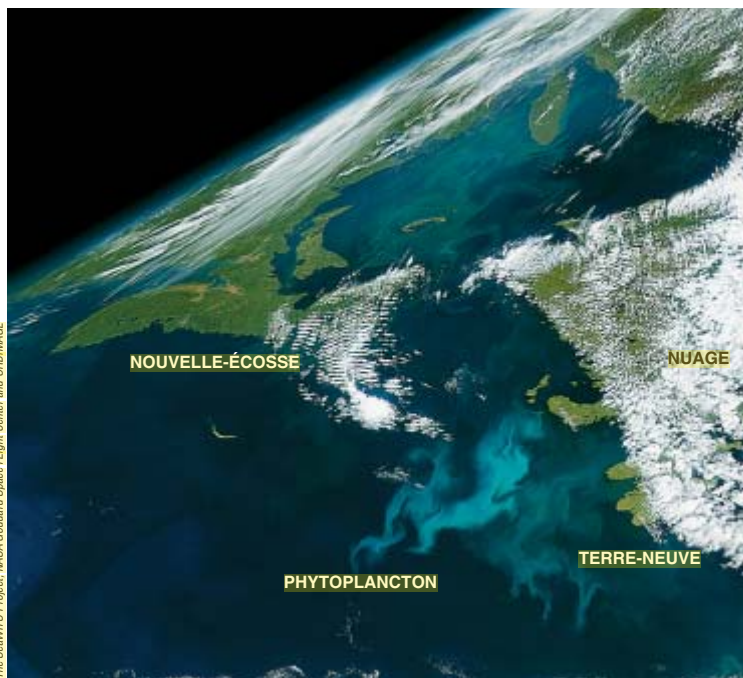
Lorsque les pouvoirs politiques ont commencé à chercher, au début des années 1990, comment limiter cette croissance, ils ont pensé aux océans, qui pourraient piéger tout le dioxyde de carbone émis par la combustion des combustibles fossiles. Plusieurs organismes de recherche publics et privés ont proposé d'accélérer artificiellement la pompe biologique afin d'accroître le stockage dans les roches : on favorise la croissance du phytoplancton, de façon à ce qu'il y ait davantage de cellules mortes qui emportent le carbone vers les profondeurs océaniques. On pourrait stimuler la croissance du phytoplancton en ajoutant des nutriments à la surface de l'océan ou favoriser l'absorption des nutriments qui ne sont pas consommés.

La fertilisation de l'océan

Jusqu'à ce que des mesures faites ces dix dernières années dévoilent la répartition des nutriments dans les océans, les biologistes ignoraient comment stimuler la croissance du phytoplancton. Parmi les deux nutriments primaires indispensables au phytoplancton – l'azote et le phosphore – on a longtemps pensé que le phosphore était le plus rare. Essentiel pour la synthèse des acides nucléiques, le phosphore se trouve exclusivement dans les minéraux phosphatés des roches continentales, et gagne l'océan uniquement par les fleuves. En revanche, le diazote est le gaz le plus abondant dans l'atmosphère terrestre et se dissout dans l'eau de mer.

Au début des années 1980, les biologistes ont réalisé qu'ils surestimaient la quantité d'azote disponible pour le phytoplancton. Le phytoplancton ne peut généralement pas utiliser le diazote pour fabriquer des protéines, tant qu'il n'est pas combiné à de l'hydrogène ou à de l'oxygène sous forme d'ions ammonium (NH_4^+), d'ions nitrite (NO_2^-) ou d'ions nitrate (NO_3^-). L'essentiel de l'azote est fixé par des bactéries et par des cyanobactéries qui le convertissent en ions ammonium, libérés dans l'eau lorsque les organismes meurent et se décomposent. Sans l'action de ces bactéries, l'azote, malgré son abondance dans les océans, est inutile pour le phytoplancton.

La croissance du phytoplancton est toujours limitée par l'azote disponible. Pour catalyser la transformation de l'azote en une forme assimilable par le phytoplancton, les bactéries utilisent une enzyme, la nitrogénase dont le fonctionnement dépend d'un autre élément, le fer. Dans les cyanobactéries, la fixation de l'azote repose sur la production d'adénosine triphosphate (ATP), un mécanisme qui



3. L'EFFLORESCENCE annuelle des phytoplanctons coccolithophores, observée par satellite, s'étend en tourbillons verdâtres sur plusieurs centaines de kilomètres carrés, dans l'océan Atlantique Nord, juste au Sud de Terre-Neuve. Ces efflorescences surviennent au printemps quand les courants font remonter les nutriments des profondeurs vers les eaux de surface, éclairées par le Soleil.