

nécessite beaucoup de fer. C'est pourquoi de nombreux océanographes pensent que le fer limite la quantité de diazote fixée par ces organismes.

Au milieu des années 1980, John Martin, aux Laboratoires *Moss Landing Marine*, en Californie, avait émis l'hypothèse que la faible quantité de fer disponible limite la production de phytoplancton dans de nombreuses zones océaniques. En évaluant précisément l'abondance de ce métal dans les mers, il découvrit que sa concentration dans l'océan Pacifique équatorial, l'océan Pacifique Nord-Est et l'océan Austral est si basse que le phosphore et le diazote dissous dans les eaux de surface ne sont jamais épuisés.

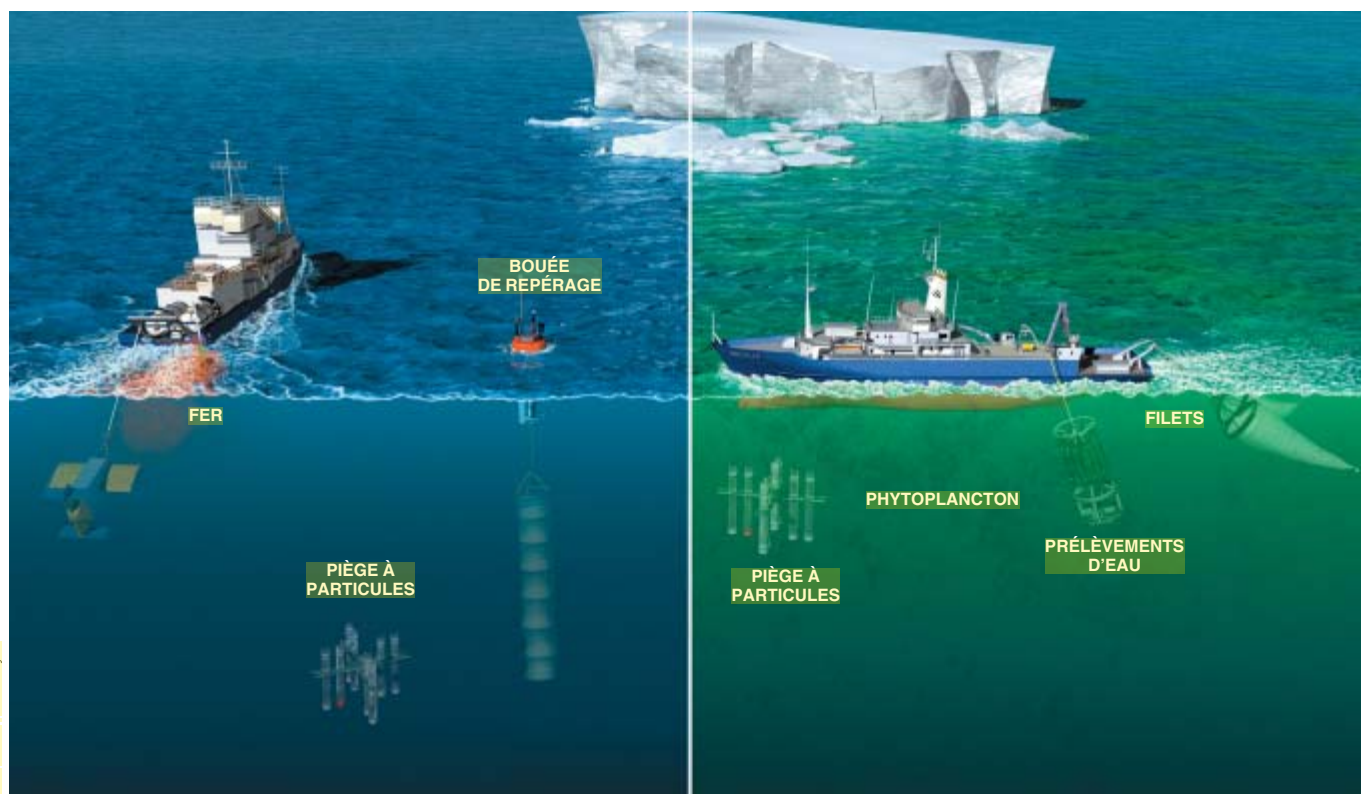
L'hypothèse de J. Martin fut d'abord controversée, en partie parce que des mesures antérieures avaient montré – à tort – que le fer était très abondant. J. Martin et ses collègues ont montré que le fer marin de surface provient quasi exclusivement de poussières apportées par le vent. Aujourd'hui on sait que dans de vastes zones de l'océan éloignées des terres la concentration en fer, élément indispensable, dépasse rarement 0,2 partie par milliard – entre un cinquantième et un centième des concentrations de phosphate ou d'azote inorganique fixé.

Des preuves enfouies au sein des couches profondes des glaces de l'Antarctique ont conforté l'hypothèse de J. Martin. Le prélèvement de glace à Vostok – un enregistrement des 420 000 dernières années de l'histoire de la Terre – indique que, comparées à celles des périodes chaudes, la quantité

de fer et la taille des particules de poussière étaient notablement supérieures pendant les périodes glaciaires. Au cours de ces périodes glaciaires, les continents étaient desséchés, et les vents forts, de sorte que beaucoup de fer et de poussières étaient arrachés aux continents et projetés dans l'atmosphère.

J. Martin et d'autres biologistes ont également remarqué que lorsque la quantité de poussières est élevée dans l'atmosphère, la concentration en dioxyde de carbone est basse et *vice versa*. Cette relation indique qu'un apport accru de fer dans les océans pendant les périodes glaciaires les plus froides a favorisé à la fois la fixation d'azote et l'utilisation des nutriments par le phytoplancton. La productivité du phytoplancton a augmenté, ce qui a stimulé l'effet de pompe biologique : la quantité de dioxyde de carbone extrait de l'atmosphère et solubilisé dans l'eau de mer a augmenté.

Pouvait-on reproduire sur des échelles de temps réduites les réactions du phytoplancton enregistrées au fil des changements de conditions climatiques qui se sont déroulés sur des milliers d'années? En 1993, J. Martin et ses collègues ont mené dans l'océan Pacifique équatorial la première expérience de croissance accélérée de phytoplancton en haute mer. Leur bateau de recherche transportait des réservoirs contenant quelques centaines de kilogrammes de fer dissous dans de l'acide sulfurique dilué. Ils ont déversé lentement la solution dans l'océan à mesure qu'ils parcouraient un carré de sept kilomètres de côté. Le résultat de cette



4. DU FER a été déversé dans la mer pour stimuler la production de phytoplancton. Une expérience menée au début de l'année 2002 a confirmé que d'infimes quantités de fer favorisent la croissance du phytoplancton. Un premier bateau (à gauche) a déversé environ une tonne de fer dissous sur quelque 300 kilomètres carrés au Sud de la Nouvelle-Zélande. Les biologistes ont repéré les zones fertilisées sur des cartes. Ils ont également placé sous l'eau des pièges à particules

pour intercepter le phytoplancton en train de sombrer vers les profondeurs. Un second bateau (à droite) prit la mer trois semaines plus tard pour observer la croissance du phytoplancton. Les biologistes ont relevé les pièges à particules et utilisé divers équipements pour évaluer les modifications du plancton et des nutriments. D'après les premiers résultats, le fer dissous dans de l'acide sulfurique dilué et dans de l'eau de mer a décuplé la vitesse de croissance du phytoplancton.

première expérience fut prometteur, mais non décisif, en partie parce qu'ils n'ont pu observer la réaction du plancton qu'une semaine durant. Le même groupe a répété l'expérience en 1995 et a pu poursuivre ses observations pendant quatre semaines : ils ont constaté sans ambiguïté que le fer ajouté accroît énormément la photosynthèse du phytoplancton, ce qui entraîne une «efflorescence» de ces micro-organismes, colorant les eaux en vert.

La fertilisation de l'océan

Depuis, trois autres groupes (en Nouvelle-Zélande, en Allemagne et aux États-Unis) ont démontré sans équivoque que l'ajout de petites quantités de fer dans l'océan Austral stimule la productivité du phytoplancton. L'expérience de fertilisation réalisée à plus grande échelle date des mois de janvier et de février 2002. Au cours du projet SOFeX, mené par l'Institut de recherche aquatique de la baie de Monterey et par le Laboratoire Moss Landing Marine, on a montré qu'une tonne de solution de fer dispersée sur environ 300 kilomètres carrés a décuplé la productivité primaire, en huit semaines.

Ces résultats ont convaincu la plupart des biologistes que le fer accélère la croissance du phytoplancton aux hautes latitudes, mais on ignore encore si cette productivité accrue renforce la pompe biologique et augmente le stockage de dioxyde de carbone dans les profondeurs de l'océan. Toutefois, selon les modèles mathématiques les plus récents, même si le phytoplancton incorporait tout l'azote et tout le phosphore disponibles dans les eaux de surface de l'océan Austral pendant les 100 prochaines années, 15 pour cent seulement du dioxyde de carbone libéré par la combustion des combustibles fossiles serait recapturé.

Malgré toutes les incertitudes concernant la fertilisation des océans, quelques groupes de laboratoires privés et publics travaillent sur des projets à grande échelle. Une entreprise a proposé de faire déverser par les navires de commerce qui traversent régulièrement l'océan Pacifique Sud de petites quantités d'un mélange d'«engrais». D'autres groupes étudient la possibilité de déclencher la floraison de phytoplancton en déversant directement dans les eaux côtières, par des tuyaux, des nutriments, dont le fer et l'ammoniaque.

Il n'est pas encore parfaitement établi que ces stratégies de fertilisation des océans soient un jour applicables. Pour être efficace, la fertilisation devra être conduite chaque année pendant des décennies. Comme la circulation océanique finit par remonter en surface les eaux profondes, tout le dioxyde de carbone supplémentaire stocké par la pompe biologique regagnerait l'atmosphère, quelques centaines d'années après la dernière campagne de fertilisation. En outre, quelles seraient les conséquences de telles opérations ? Les fermiers ne parviennent pas à confiner les engrais dans un champ, alors que dire de fertilisants déversés dans des océans turbulents ? Pour cette raison, de nombreux experts craignent que cette fertilisation à grande échelle cause des dommages à long terme qui seraient difficiles, voire impossibles, à endiguer.

Ainsi, on risquerait de perturber la chaîne alimentaire marine. Les simulations informatiques et les études des efflorescences naturelles de phytoplancton montrent que l'augmentation de la productivité primaire entraînerait un déficit en oxygène. Les micro-organismes qui consomment les cellules de phytoplancton mortes lorsqu'elles sombrent dans les profondeurs consomment parfois l'oxygène plus vite que

la circulation océanique ne le remplace. Dans ces conditions, les animaux incapables de s'échapper vers des eaux plus riches en oxygène suffoqueraient.

Solution providentielle ou boîte de Pandore ?

De telles conditions favorisent également la croissance de microbes qui produisent du méthane et de l'oxyde d'azote, deux gaz à effet de serre dont la capacité à piéger la chaleur est supérieure à celle du dioxyde de carbone. D'après l'Office américain des océans et de l'atmosphère, un déficit en oxygène et d'autres difficultés dues à l'excès de nutriments ont déjà dégradé la qualité de l'eau sur plus de la moitié des côtes des États-Unis ; c'est notamment le cas de la «zone morte» dans la partie Nord du golfe du Mexique. Des difficultés similaires surgissent dans diverses régions du monde.

Même si les éventuelles conséquences néfastes de la fertilisation étaient jugées acceptables, encore faudrait-il s'assurer que de telles mesures compenseraient les réactions des plantes et des océans à un monde plus chaud. En comparant des images obtenues par satellites au début des années 1980 et dans les années 1990, on constate que l'océan a tendance à verdir, mais plusieurs biologistes ont souligné qu'une augmentation de la productivité primaire ne garantit pas un stockage plus important du carbone dans les profondeurs océaniques. Ce pourrait même être l'inverse qui se produit. Selon des simulations numériques, le réchauffement augmenterait la stratification de l'océan, l'eau douce venant de la fonte des glaciers et des icebergs restant au-dessus de l'eau de mer salée, plus dense. Une telle stratification ralentirait la capacité de la pompe biologique à transporter le carbone de la surface vers les profondeurs.

De nouveaux satellites observent quotidiennement le phytoplancton, et les futures expériences de fertilisation à petite échelle nous permettront de mieux comprendre le comportement du phytoplancton. L'idée de développer de grands projets de fertilisation des océans pour modifier le climat reste débattue au sein de la communauté scientifique et parmi les autorités politiques. Pour beaucoup, le bénéfice temporaire des projets de fertilisation ne justifie pas les dégâts, imprévisibles, mais inévitables, que subiront les écosystèmes marins. Aujourd'hui, la société voudrait en appeler au phytoplancton actuel pour l'aider à résoudre un problème lié en partie à la combustion du phytoplancton fossile !

Paul FALKOWSKI est professeur à l'Institut de sciences marines et côtières et au Département de géologie de l'Université Rutgers.

Paul FALKOWSKI et John RAVEN, *Aquatic Photosynthesis*, Blackwell Scientific, 1997.

Paul FALKOWSKI et al., *The Global Carbon Cycle : A Test of Our Knowledge of the Earth as a System*, in *Science*, vol. 290, pp. 291-294, 13 octobre 2000.

P. CHISHOLM, *Stirring times in the Southern Ocean*, in *Nature*, vol. 407, pp. 685-687, 2001.

Z. NEUFELD, P. HAYNES, V. GARÇON et J. SUDRE, *Ocean fertilization experiments may initiate a large scale phytoplankton bloom*, in *Geophysical Research Letters*, n°1129, 10.1029/2001GL013677, 2002.
