

Le risque d'envahissement de l'efflorescence

Dès 1993, commencèrent les premières expériences, à petite échelle, de fertilisation en fer de l'océan. Les biologistes cherchaient à élucider la relation entre une injection de fer, l'accroissement de la photosynthèse, et l'augmentation possible de l'export de carbone vers l'océan profond (la pompe biologique devrait être plus efficace). À ce jour, la relation apport de fer–production accrue de phytoplancton est vérifiée, mais il n'existe pas d'évidence *in situ* que la pompe biologique soit plus efficace ni que la séquestration profonde du carbone soit améliorée.

Parallèlement à ces expériences *in situ*, nous avons examiné à l'aide d'un modèle mathématique simple l'impact sur l'écosystème d'une perturbation transitoire locale, sous la forme d'une injection de fer comme celle pratiquée lors des expériences de terrain. Ce modèle combine les effets du mélange par les tourbillons océaniques et la

croissance du phytoplancton. Il comporte trois éléments qui interagissent : le phytoplancton, le zooplancton et l'anomalie de la concentration en fer. Une première simulation montre que, après l'injection sur un domaine circulaire de 24 kilomètres de diamètre et sans la présence de tourbillons, l'efflorescence de phytoplancton se propage en anneaux circulaires. En présence de tourbillons, le système évolue différemment : des filaments d'efflorescence du phytoplancton se forment et remplissent peu à peu le domaine modélisé (500 kilomètres de côté). On conclut de cette étude qu'une efflorescence du phytoplancton plus étendue que prévue pourrait se produire, en mer, lors d'expériences de fertilisation par le fer.

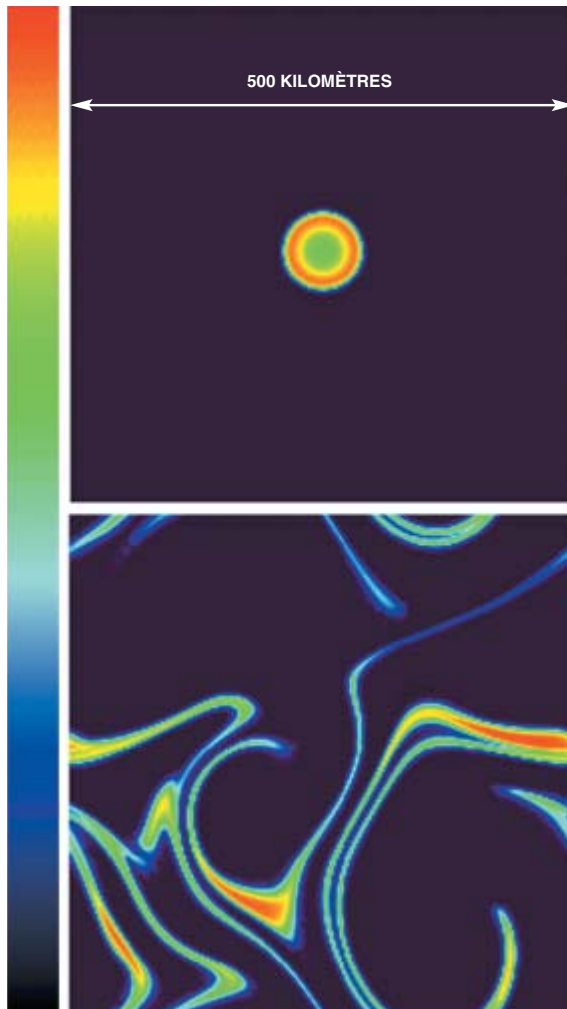
Il s'agit bien sûr d'un modèle simple qui comporte quelques hypothèses quant à la paramétrisation biogéochimique (les liens entre les concentrations de phytoplancton, de zooplancton et de fer), et quant au choix des valeurs numériques des coefficients biologiques, souvent méconnues. Nous avons conduit une analyse de sensibilité où nous avons fait varier l'ensemble des valeurs numériques des paramètres biologiques du modèle. Dans l'espace des paramètres, plusieurs domaines apparaissent : un domaine où l'efflorescence de phytoplancton ne se déclenche pas, un où les concentrations de phytoplancton deviennent oscillatoires (état d'équilibre instable), un où l'efflorescence se déclenche, mais ne se propage pas, et celui où l'efflorescence se propage par filaments.

Les valeurs numériques des paramètres dans ce dernier cas sont tout à fait raisonnables et il ne faut donc pas exclure sur le terrain des conséquences altérant notablement l'écosystème marin naturel. Notre description de l'élément fer est rudimentaire dans le modèle, puisque nous ne considérons pas les diverses formes possibles du fer en milieu océanique. L'écoulement physique considéré est lui aussi simplifié. Toutefois, il nous semble primordial de rappeler qu'une analyse détaillée de l'écosystème est un prérequis à toute « manipulation océanique » du fer (les interactions des processus biologiques, chimiques et physiques dans l'océan sont complexes et non linéaires). Ces connaissances ne semblent acquises que dans le cadre d'expériences menées à petite échelle.

L'utilisation de la fertilisation massive de l'océan par le fer pour réguler le climat semble attirer de nombreux industriels. En effet, dans le marché global du commerce des émissions de carbone et des « crédits de carbone », nombre d'entreprises se lancent dans des projets de fertilisation de grande ampleur et semblent plus concernées par le profit économique potentiel que par les conséquences à long terme sur l'équilibre du système océanique. Pourtant, comme le soulignait une océanographe américaine, Penny Chisholm, avant de décider du devenir du patrimoine commun, il faut savoir tirer les leçons de nos erreurs passées (accroissement inconsidéré de la production d'oxyde d'azote, combustion accélérée des énergies fossiles...). La fertilisation massive de l'océan aura sans nul doute des conséquences imprévisibles. La leçon est simple : la fertilisation de l'océan ne peut être maintenue sur le long terme. Alors pourquoi commencer ?

Un nouveau programme en océanographie intitulé OCEANS (analyse des écosystèmes et de la biogéochimie marins) se met en place ; son objectif est une meilleure compréhension de la sensibilité de l'océan au changement global, et une étude approfondie des cycles biogéochimiques, des réseaux trophiques marins et de leurs interactions. Dans ce programme, la connaissance de la dynamique du fer (ses sources, ses réserves, sa disponibilité et sa distribution spatiotemporelle) et de son évolution dans un climat changeant reste un enjeu majeur.

Joël SUDRE et Véronique GARÇON, Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale – CNRS, Toulouse



Modélisation de la concentration de phytoplancton dans une portion d'océan de 500 kilomètres de côté dans une zone sans tourbillons (*en haut*) et dans une zone tourbillonnaire (*en bas*). Sur l'échelle de couleurs, la concentration est nulle dans les zones sombres et maximale dans les zones orangées. Dans la zone calme, on constate, 150 jours après l'ajout du fer, une croissance homogène avec un maximum (*en orange*). Dans la zone avec tourbillons, « observée » 90 jours après l'addition du fer, d'immenses filaments d'efflorescence envahissent la portion d'océan modélisée.

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.

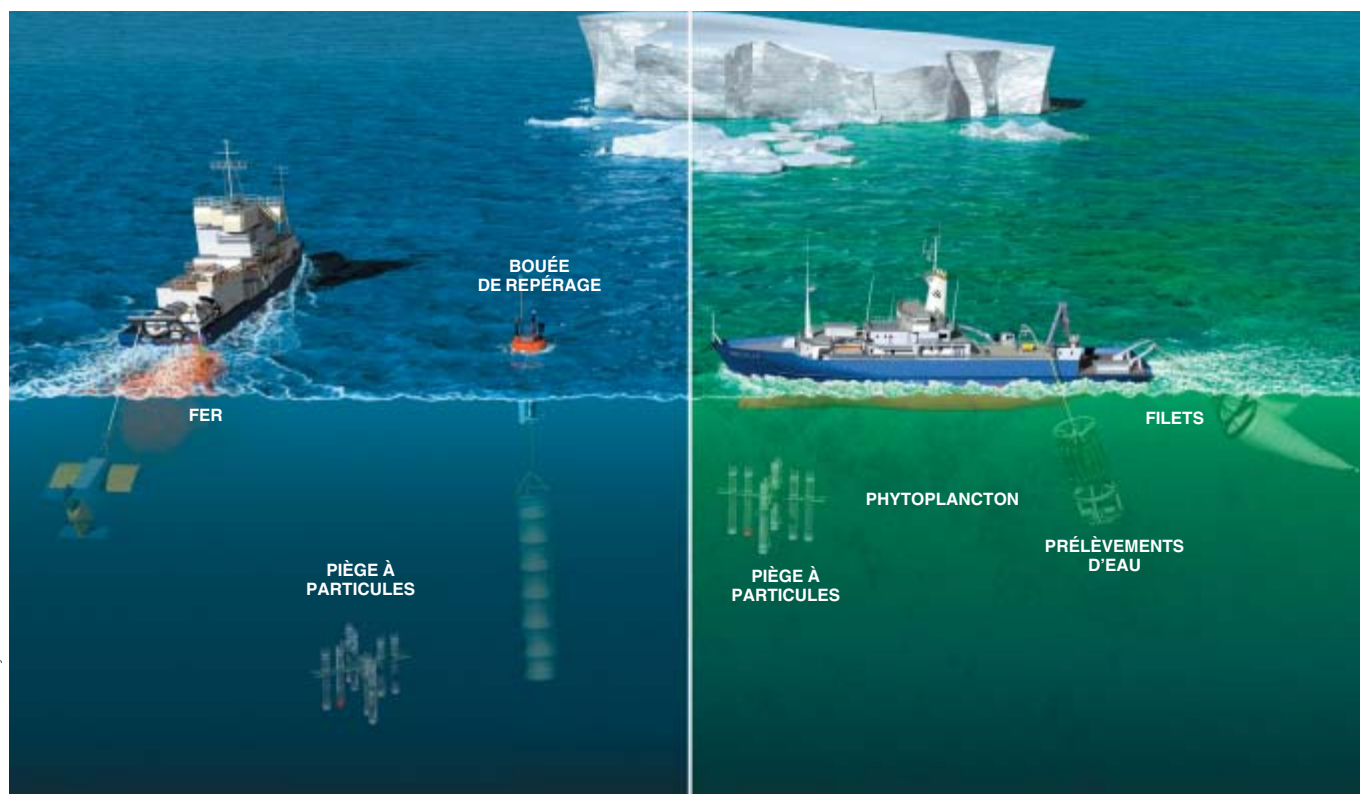
L'hypothèse de J. Martin fut d'abord controversée, en partie parce que des mesures antérieures avaient montré – à tort – que le fer était très abondant. J. Martin et ses collègues ont montré que le fer marin de surface provient quasi exclusivement de poussières apportées par le vent. Aujourd'hui on sait 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.