

Faut-il fertiliser

l'océan pour contrôler le climat ?

1 Le CO₂, à l'origine du réchauffement climatique

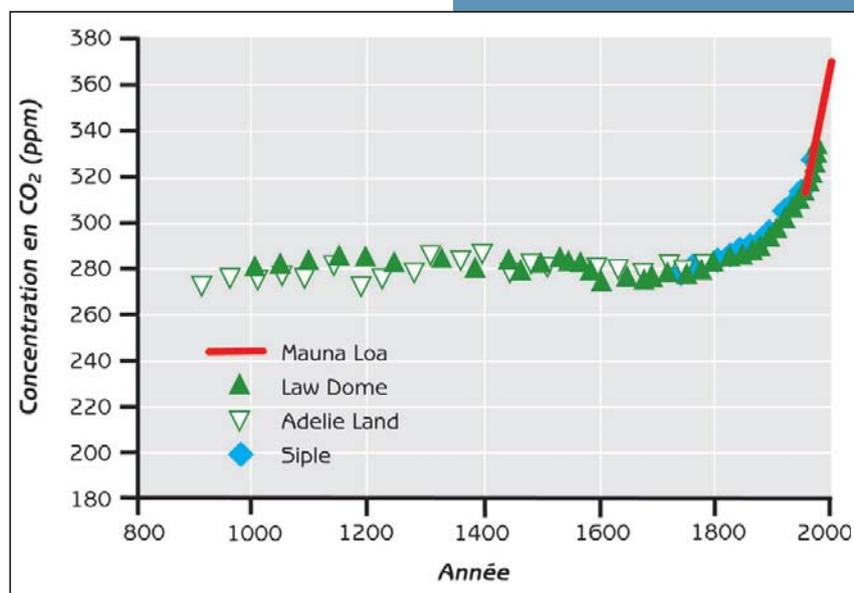
L'augmentation de la concentration de dioxyde de carbone CO₂ dans l'atmosphère est maintenant largement documentée (Figure 1). Le Groupe international d'experts sur le climat (voir l'encart « Le GIEC ») a rassemblé de nombreuses preuves, issues des travaux de la communauté scientifique internationale, démontrant que cette augmentation est en grande partie à l'origine d'un dérèglement climatique mondial inquiétant, par intensification de l'effet de serre. Par ailleurs, les conclusions du rapport du GIEC sont en ces termes : « Il est *fort probable* que l'augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre est responsable, dans une large mesure, de la hausse des températures moyennes mondiales depuis le milieu du xx^e siècle. Il est *fort peu probable* que ce réchauffement soit imputable à la seule variabilité naturelle du climat [1]. »

Depuis le début de l'ère industrielle, les rejets de carbone dans l'atmosphère (Figure 2)

ont conduit à une augmentation d'environ 100 ppm de la teneur en CO₂ : celle-ci est passée de 280 ppm à 380 ppm. À partir de bulles d'air emprisonnées dans les carottes glaciaires, on a pu analyser la teneur en CO₂ de l'atmosphère et montrer qu'elle était restée très stable pendant les 10 000 ans qui ont précédé la période actuelle, et qu'il faut remonter à des périodes encore plus anciennes pour rencontrer des fluctuations naturelles du CO₂ de la même ampleur que celle qui est actuellement produite par l'homme (Figures 3 et 4). En effet, lors des périodes glaciaires, les concentrations

Figure 1

Évolution du CO₂ atmosphérique depuis le début de sa mesure à Hawaï (courbe rouge). Les données précédentes ont été obtenues grâce à l'analyse de bulles d'air dans les carottes de glaces.



LE GIEC

(GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT)

En 2007 a été attribué au GIEC le prix Nobel de la Paix, conjointement avec Al Gore. Créé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), le GIEC a pour mission d'évaluer les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique nécessaires pour suivre l'évolution actuelle du climat, démontrer la réalité du changement climatique, mieux comprendre les fondements scientifiques des risques qui lui sont liés et la part qui serait d'origine humaine, en cerner plus précisément les conséquences possibles et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue.



Figure 2

Les activités humaines à l'origine de la pollution atmosphérique.

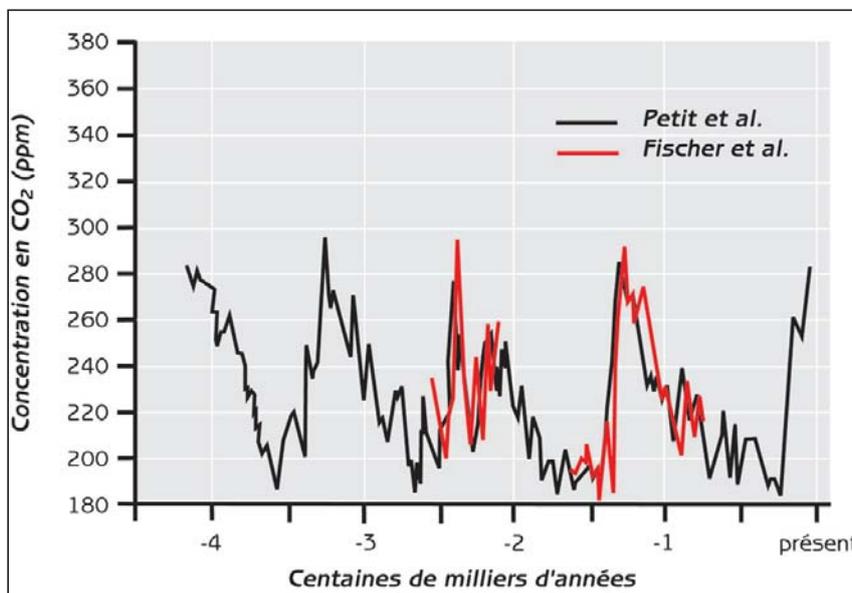
en CO_2 chutaient d'environ 100 ppm par rapport aux périodes interglaciaires [2]. L'origine de ces fluctuations régulières du CO_2 n'est pas encore totalement élucidée mais il est certain qu'elle est à rechercher dans l'océan...

2 Comment l'océan absorbe-t-il le CO_2 ?

Nous le savons maintenant, au lieu de s'accumuler dans l'atmosphère, environ un tiers du CO_2 émis est enfoui dans un « puits » situé dans l'océan.

Figure 3

L'historique des fluctuations du CO_2 dans l'atmosphère lors des périodes glaciaires et interglaciaires, déduite de la carotte de glace Vostok (Antarctique).



Nous l'avons vu dans le Chapitre introductif « Les grandes questions en sciences chimiques de l'environnement marin », l'océan est doté de deux grandes « pompes à CO_2 » qui lui permettent de jouer le rôle d'un puits pour ce gaz : la pompe physique et la pompe biologique. La pompe physique est principalement présente dans certaines zones polaires et sub-polaires : le refroidissement des eaux de surface augmente leur capacité à dissoudre le CO_2 atmosphérique tout en augmentant leur densité. Emportant leur charge en CO_2 , ces eaux plongent alors en profondeur, où elles seront soustraites à tout contact atmosphérique pour des durées de l'ordre du millier d'années. L'autre pompe, dite biologique (Figure 5), est assurée par le phytoplancton. Ces organismes microscopiques, comme les diatomées (Figure 6), sont présents en quantité importante dans les couches superficielles de la mer et utilisent l'énergie du soleil pour transformer le CO_2 , initialement présent dans l'atmosphère puis dissous dans l'eau, en particules de matière organique. Par ailleurs, d'autres algues telles que les coccolithophoridés incorporent aussi du carbone dans leurs coquilles calcaires, par la réaction de calcification qui conduit à la formation de carbonate de calcium CaCO_3 . Toutefois, cette réaction est avant tout une source de CO_2 ¹. Le carbone entre ainsi dans la chaîne alimentaire avant d'être minéralisé en grande

1. L'équation bilan de la réaction de calcification est : $2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

partie dans la couche de surface, tandis qu'environ un dixième sédimentera dans les couches profondes de l'océan, et seulement environ un centième s'accumulera sous forme de sédiment. L'entraînement du carbone organique particulaire est appelé pompe biologique molle et l'entraînement du CaCO_3 est appelé pompe biologique dure.



Figure 4

La Terre a connu diverses périodes glaciaires au cours de son histoire. La période glaciaire « Quaternaire » est la mieux connue et aussi la plus récente, caractérisée par une alternance de refroidissement (glaciaires) et de réchauffement relatif (interglaciaire) qui a commencé il y a deux millions d'années. Nous vivons aujourd'hui dans une phase qui pourrait se prolonger encore 10 000 ans et davantage.

Figure 5

Grâce à la lumière, le phytoplancton transforme par photosynthèse le CO_2 en matière organique, qui se fixe ainsi au niveau de la couche de surface de l'océan. Le carbone y est stocké pour une durée inférieure à un an, car les bactéries re-minéralisent la matière organique. Une autre partie du carbone sédimente sous forme de cellules mortes et débris. Le carbone est alors stocké dans les couches profondes de l'océan pour des durées de 1 à 1 000 ans. Seul le faible pourcentage de carbone qui atteint les sédiments est stocké pour des temps géologiques.

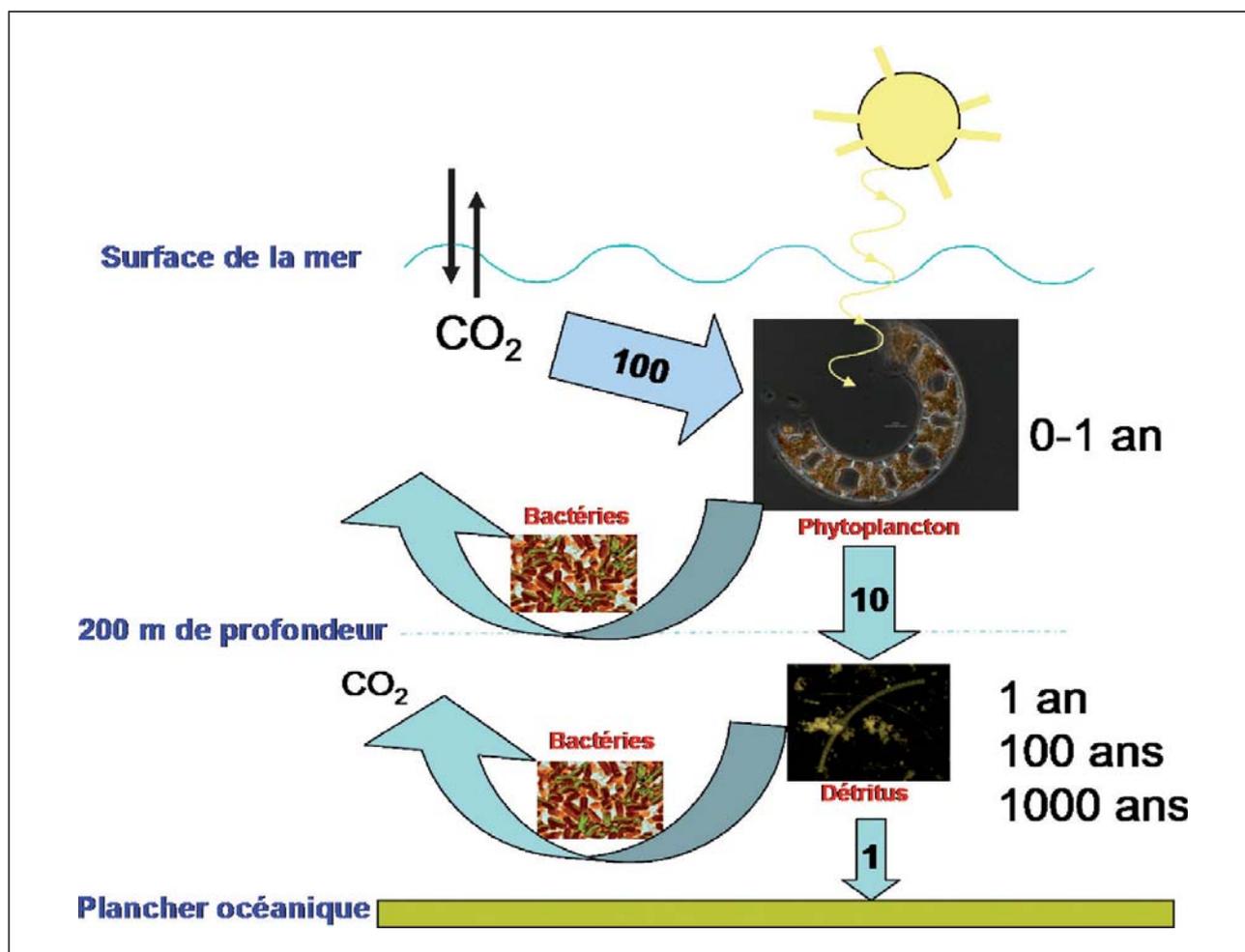




Figure 6

Un acteur important de la pompe biologique : les diatomées, phytoplancton à squelette siliceux. Sur la photo, l'espèce *Eucampia antarctica* prélevée pendant la mission KEOPS (Océan Austral), photographie au microscope optique.

Par ces processus de pompage du CO_2 , l'océan constitue ainsi le principal puits de carbone planétaire.

3 L'océan Austral, une pompe biologique « rouillée » ?

L'océan Austral (Figure 7) est l'un des plus grands puits de carbone, absorbant à lui seul jusqu'à 15 % des émissions de CO_2 planétaires ! Mais à regarder de près, l'océan Austral est le siège d'un paradoxe aujourd'hui bien documenté en océanographie. Les eaux profondes qui remontent à la surface dans cet océan sont riches en sels nutritifs, azote, phosphore, silicium, qualifiant ainsi cette zone de *High Nutrient Low Chlorophyll* (HNLC). Pourtant, cette ressource reste largement inutilisée par le phytoplancton, qui par conséquent se développe peu, entraînant une faible efficacité de la pompe biologique de CO_2 . Deux décennies de recherche ont permis d'établir sans ambiguïté que le phytoplancton des régions HNLC présentait une carence en fer. Le fer serait donc la clé de l'énigme. Mais alors pourquoi la pompe biologique s'était-elle essouffée, après sa longue activité pendant les périodes glaciaires ?

3.1. L'hypothèse du fer

En 1990, le scientifique américain John Martin a proposé une explication de ce phénomène qui stipule que la pompe biologique dans l'océan Austral aurait été activée par des apports de fer liés à l'intensification des dépôts de poussières d'origine désertique

pendant les périodes glaciaires [3]. Pour cela, John Martin se basait sur ces trois faits principaux :

1) À l'heure actuelle, l'océan Austral contient une énorme quantité de sels nutritifs (azote, phosphore) non utilisés. L'activité biologique y est faible et la pompe biologique tourne au ralenti.

2) Des ajouts de petites quantités de fer dans des bouteilles contenant de l'eau de surface de cet océan induisaient une augmentation de l'activité biologique.

3) Pendant les périodes glaciaires, les apports de poussières dans l'océan Austral étaient plus importants que pendant les périodes interglaciaires. Ces poussières d'origine terrigène proviendraient des grandes régions désertiques ; ce serait selon ce scénario paléoclimatique qu'une quantité importante de fer aurait été apportée dans l'océan [4].

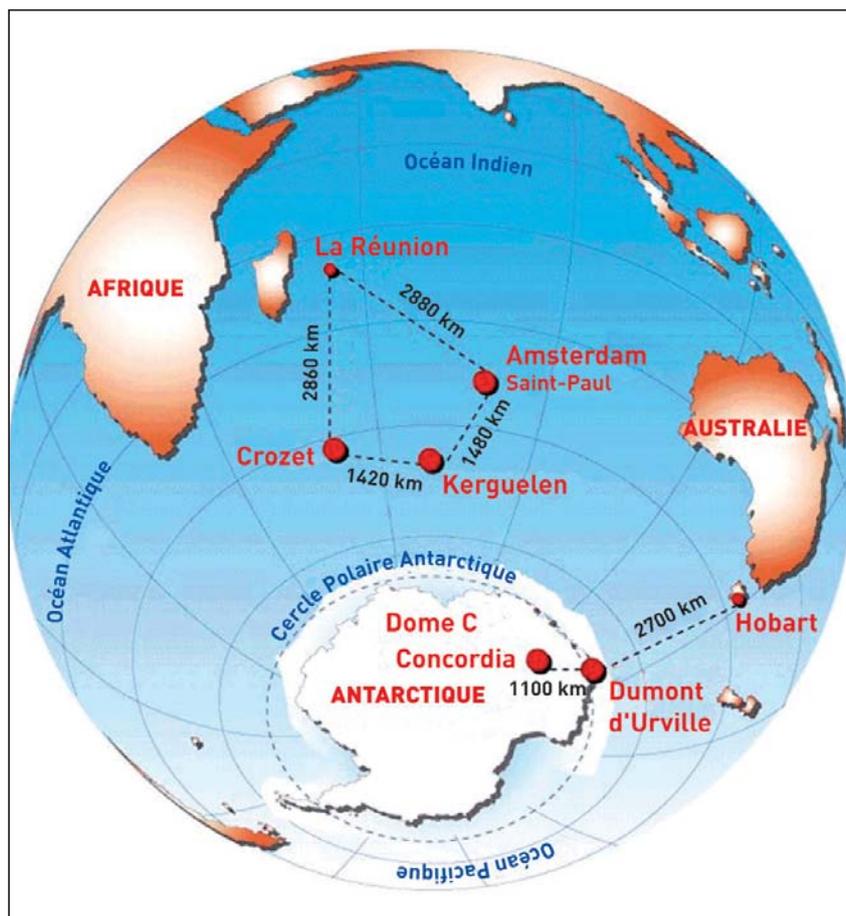
Son hypothèse peut donc être résumée ainsi : pendant les périodes glaciaires, l'ajout de fer a stimulé la pompe biologique de carbone dans l'océan Austral, entraînant une baisse du CO_2 dans l'atmosphère.

Poursuivant son idée, lors de sa participation en 1988 à un séminaire à Woods Hole, célèbre institut océanographique de la côte Est des États-Unis, John Martin lança, sous la forme d'une boutade, une petite phrase dont l'écho résonne encore vingt ans plus tard : « *Donnez-moi un demi-tanker avec 300 000 tonnes de fer et je vous donnerai un âge glaciaire.* » Aujourd'hui les projections faites par le GIEC,

selon les différents scénarios d'émission envisagés, montrent des teneurs en CO_2 dans l'atmosphère à la fin de ce xxi^{e} siècle comprises entre 450 et 800 ppm. De plus, les observations récentes semblent indiquer que nous flirtions avec les scénarios les plus extrêmes proposés par le GIEC. Si une grande majorité des opinions publiques et des décideurs sont conscients de l'urgence de réduire les émissions de CO_2 , d'autres prônent plutôt la recherche de solutions technologiques. C'est ici que la provocation de John Martin pourrait se transformer en procédé de géo-ingénierie climatique :

« fertiliser » l'océan pour activer la pompe biologique et réduire le CO_2 atmosphérique. Mais l'hypothèse du fer, telle que John Martin l'avait énoncée, a-t-elle été totalement validée sur le plan scientifique ?

Dans les premières années qui ont suivi sa publication, un très vif débat s'est engagé dans la communauté scientifique sur la validité de cette hypothèse. Les expériences étaient difficiles à réaliser et leurs interprétations n'étaient pas sans ambiguïté. Dans ce contexte, une approche entièrement nouvelle a été proposée : réaliser une « fertilisation » à petite échelle de l'océan et observer sa réaction par comparaison avec une zone non fertilisée. Ainsi, de même que l'on fertiliserait la terre pour faire pousser les plantes, on pourrait envisager de fertiliser l'océan par ajout de fer, pour augmenter la croissance du phytoplancton, l'acteur de la pompe biologique !



3.2. Les expériences de fertilisation artificielle

Au cours d'une expérience de fertilisation artificielle de l'océan, l'objectif fixé est d'augmenter la concentration naturelle de la couche de surface de l'océan d'un facteur 10 environ sur une surface d'environ 100 kilomètres carrés. Comme les concentrations initiales sont inférieures à $0,1 \text{ nmol/l}$, un simple calcul montre que l'ajout de quelques tonnes de fer suffit. Dans la pratique, du sulfate de fer, tel que celui utilisé en agriculture, est dissous dans de l'eau de mer acidifiée (Figure 8). Afin de suivre ce « patch » qui va se diluer et se déplacer dans l'océan, on injecte simultanément un gaz inerte et facilement détectable, l'hexafluorure de soufre SF_6 , (Figure 9), puis on

Figure 7

L'océan Austral, ou océan Antarctique, est l'étendue d'eau qui entoure l'Antarctique. C'est en surface le quatrième océan, et le dernier défini, puisque c'est une décision de l'Organisation hydrographique internationale (OHI) qui a accepté en 2000 le nom d'océan Austral. Kerguelen est le plus grand archipel subantarctique français avec 7215 km^2 .

EXPÉRIENCE DE FERTILISATION ARTIFICIELLE : INJECTER DU FER DANS LA MER



Figure 8

On remplit les cuves avec le sulfate de fer.



Figure 9

On peut voir à gauche deux cuves remplies de sulfate de fer. Des cuves sont mises en place pour l'injection simultanée du fer avec le traceur SF_6 , à l'arrière du bateau.

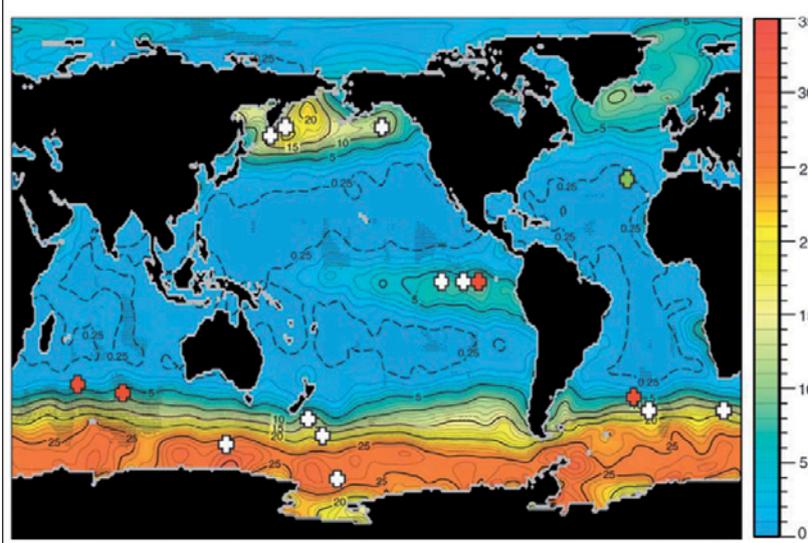


Figure 10

Localisation des différentes expériences de fertilisation artificielles (croix blanches) et naturelles (croix rouges). Les zones en orange et vert sont les zones HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) reconnaissables aux fortes valeurs de nitrates dans l'eau de surface.

suit la zone fertilisée pendant plusieurs jours voire plusieurs semaines.

La première de ces expériences de fertilisation artificielle a eu lieu dans le Pacifique Équatorial au voisinage des Îles Galápagos. Elle a été suivie par une douzaine d'autres expériences similaires dans différentes régions (Figure 10) [5]. De ces expériences émergent clairement quelques grandes lignes. Dans chacune d'entre elles, l'ajout de fer a stimulé la croissance du phytoplancton, entraînant bien le creusement d'un puits de CO_2 dans la couche de surface, de l'ordre de quelques dizaines de ppm. Ce résultat montre clairement que la première partie de l'hypothèse de John Martin est correcte : le phytoplancton est bien limité en fer dans les régions HNLC comme l'océan Austral. En revanche, ces expériences ont peiné à démontrer que la pompe biologique se mettait réellement en marche, et donc que l'ajout de fer entraînait une augmentation du flux de carbone en profondeur. Dans l'océan Austral, seule l'expérience SOFeX (Southern Ocean Iron Experiment) [6] a mesuré un léger excès d'exportation de carbone sous la zone fertilisée.

Comment se fait-il donc que l'exportation de carbone n'ait pas augmenté, alors que l'on observe clairement une augmentation de production primaire ? Plusieurs hypothèses peuvent être avancées. Lors de ces expériences, les scientifiques ont dû quitter les lieux, pour des raisons logistiques, alors que

le phytoplancton était encore en bonne santé. L'exportation de carbone aurait donc pu se produire plus tard. Toutefois, les fertilisations à petite échelle semblent aussi sujettes à un important artefact : après sa formation, la zone fertilisée est petit à petit diluée par les eaux environnantes, ce qui a notamment pour effet de défavoriser l'agrégation de la matière qui est susceptible de sédimenter, et donc de réduire l'exportation de carbone. Pour contourner ces difficultés, il fallait donc imaginer une autre stratégie pour tester l'hypothèse du fer... en se tournant plutôt vers la voie des fertilisations naturelles.

3.3. Les fertilisations naturelles

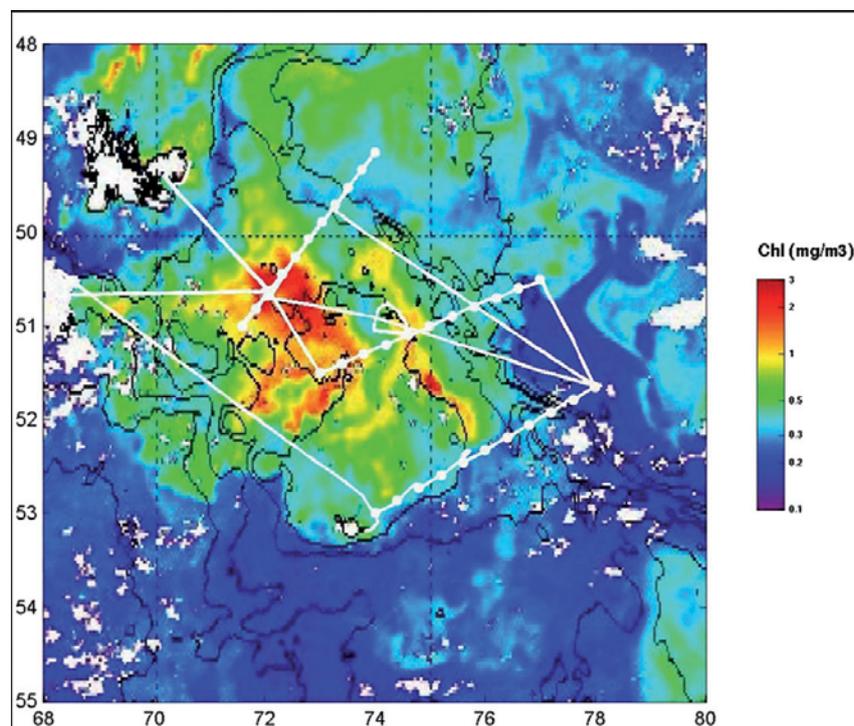
Cette stratégie avait été proposée dès 1992 par John Martin. Dans son projet déposé au National Science Foundation pour financer la première expérience de fertilisation artificielle IronEx1 (*Iron fertilisation experiment 1*), il avait également décrit une expérience de fertilisation naturelle appelée PlumEx. L'idée était d'étudier une zone riche en phytoplancton à l'ouest des Îles Galapagos et de démontrer que cette richesse était liée à un apport de fer dû à la présence de l'île. Toutefois, lors de la campagne océanographique réalisée en octobre 1993, la majorité des efforts avaient surtout porté sur l'expérience de fertilisation IronEx1, alors que seules quelques investigations avaient été menées dans le cadre de PlumEx. Elles ont cependant permis de mettre

en évidence l'apport de fer au voisinage de l'île.

Ce n'est qu'une quinzaine d'années plus tard que l'étude d'une fertilisation naturelle a été menée de manière approfondie au travers du projet KEOPS (KErguelen Ocean and Plateau compared Study). Cette étude a été réalisée au voisinage de l'archipel des Kerguelen dans le secteur indien de l'océan Austral (*voir Figure 7*). Les images satellites qui mesurent la couleur de l'eau montrent clairement la présence récurrente d'une **efflorescence**, ou « bloom », de phytoplancton dans le quasi désert biologique des eaux environnantes (*Figure 11*). Les trois objectifs du projet KEOPS étaient de démontrer que cet oasis était dû à l'apport de fer, et d'étudier en détail l'écosystème qui s'y développe ainsi que les conséquences de la fertilisation sur les cycles biogéochimiques. Il s'agissait en particulier de résoudre la question de la quantification

Figure 11

Cette image, produite par un satellite qui mesure la couleur de l'eau de surface, fait apparaître le bloom de Kerguelen. Cette mesure permet de calculer la concentration en chlorophylle dans l'eau. Une gamme de fausse couleur est utilisée. Les zones rouges correspondent aux plus fortes concentrations, les zones bleues aux plus faibles. Pendant la campagne KEOPS, de telles cartes étaient reçues en temps réel à bord pour affiner le choix des stations (points blancs). Le trait blanc représente le trajet du navire entre les stations.



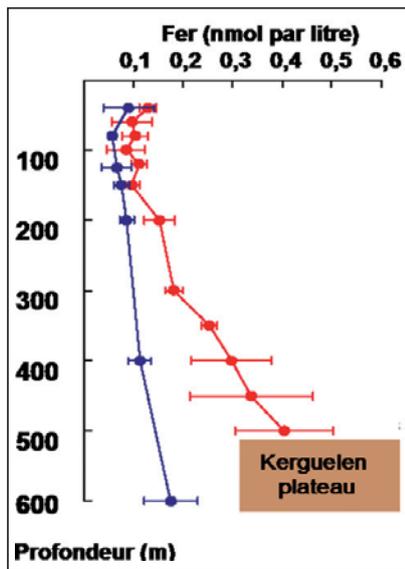


Figure 12

Comparaison des profils de fer sur le plateau de Kerguelen (en rouge) et dans les eaux du large (en bleu). Ces profils montrent clairement l'enrichissement en fer dans les eaux profondes au dessus du plateau.

de l'exportation de carbone laissé en suspens par les fertilisations artificielles.

La campagne océanographique s'est déroulée en janvier-février 2005, à bord du navire océanographique *Marion Dufresne* (voir Chapitre de C. Jeandel, [Figure 13](#)). La comparaison des mesures de fer, réalisées sur le plateau et dans les eaux du large ([Figure 12](#)), a permis de démontrer clairement la présence d'une source de fer dans les eaux profondes du plateau. Ce fer est rendu disponible pour le phytoplancton par divers mécanismes de mélange vertical. Son apport continu, ainsi que celui d'autres sels nutritifs comme l'azote, le phosphore et le silicium, permettent de maintenir l'efflorescence de phytoplancton pendant une durée exceptionnellement longue – environ trois mois. Pour comparer l'impact d'une fertilisation naturelle à celui d'une fertilisation artificielle, il faut déterminer leurs efficacités respectives. Celles-ci sont définies comme le rapport entre l'excès de carbone exporté et l'excès de fer apporté. Les excès sont calculés par différence entre la zone fertilisée et non fertilisée. Les résultats de KEOPS sont sans ambiguïté : la fertilisation naturelle est 10 à 100 fois plus efficace que des fertilisations artificielles [6].

Comment expliquer ce résultat ? Trois arguments peuvent être avancés. La forme chimique sous laquelle se trouve le fer ([Encart « Le fer dans la mer : sous quelles formes ? »](#)) en milieu naturel est très différente de celle

obtenue par dispersion de sulfate de fer. Le mode d'injection est aussi très différent : il est continu pour la fertilisation naturelle à Kerguelen et épisodique pour la fertilisation artificielle, et finalement, la longue durée de l'efflorescence permet le développement d'un écosystème qui n'a pas le temps de se mettre en place dans les expériences artificielles de plus courte durée. KEOPS permet donc de démontrer que la fertilisation naturelle augmente l'exportation de carbone et donc active la pompe biologique, ce qui confirme l'hypothèse de John Martin.

Toutefois, KEOPS ne clôt pas définitivement le débat sur la validité de cette hypothèse. En effet, le mode de fertilisation naturelle observé pendant KEOPS est très différent du processus de fertilisation par des poussières atmosphériques qui auraient fertilisé l'océan Austral pendant les périodes glaciaires. Ce dernier processus est par nature épisodique et le fer s'y trouve sous une forme chimique différente. KEOPS permet-il d'apporter de nouvelles données par rapport aux projets de géo-ingénierie ?

3.4. Les fertilisations à grandes échelles

La douzaine d'expériences de fertilisation artificielle avait jeté le doute sur l'efficacité des processus de géo-ingénierie visant à utiliser ce mode de fertilisation des océans à grande échelle pour réduire le CO₂ atmosphérique. La plus grande efficacité de la fertilisation naturelle observée pendant KEOPS remet-elle

en cause cette conclusion ? Clairement non ! Le mode d'injection et la forme de fer envisagés dans les projets de fertilisation artificielle sont trop éloignés des caractéristiques des processus naturels pour que les géo-ingénieurs puissent en tirer argument.

Pourtant, les projets de géo-ingénierie n'ont jamais été aussi avancés. Plusieurs sociétés, notamment américaines, travaillent sur le sujet. Lors du congrès international sur la fertilisation de l'océan qui s'est tenu à Woods Holes en septembre 2007 [7], les différentes approches, scientifiques, mais aussi économiques ou légales, ont été évoquées. Plusieurs points importants émergent. Du point de vue scientifique, hormis les doutes sur l'efficacité réelle du procédé pour compenser l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère, les possibles effets secondaires de telles expériences ont été discutés. La fertilisation pourrait générer d'autres gaz à effet de serre tel que l'oxyde nitreux N_2O – son effet de serre serait 300 fois plus important que celui du CO_2 ! – annulant partiellement le bénéfice de l'absorption de CO_2 , la décomposition en profondeur de la matière organique synthétisée en surface pourrait créer de vastes zones appauvries en oxygène avec de possibles conséquences sur les autres organismes (poissons par exemple), la pénétration de la lumière pourrait être modifiée par la biomasse accumulée en surface. Aucune de ces possibles conséquences n'a pour l'instant été sérieusement étudiée. Faut-il également

LE FER DANS LA MER : SOUS QUELLES FORMES ?

Sous quelles formes chimiques le fer doit-il se trouver pour être assimilable par le phytoplancton ? La question n'est pas encore élucidée. D'autant que ces formes diffèrent très probablement d'une espèce d'algue à une autre. Dans l'eau de mer, le fer est peut-être présent sous de nombreuses formes chimiques : forme dite « oxydée » Fe(III) ou forme « réduite » Fe(II) ; forme minérale dissoute (Fe'), forme organique dissoute (complexe de fer, FeL), ou encore particulaire, comme par exemple des oxydes ou hydroxydes de fer. Ces différentes formes interagissent entre elles (d'après les flèches de la *Figure 13*). Les mécanismes d'acquisition du fer par les cellules du phytoplancton ne sont pas totalement compris par les scientifiques.

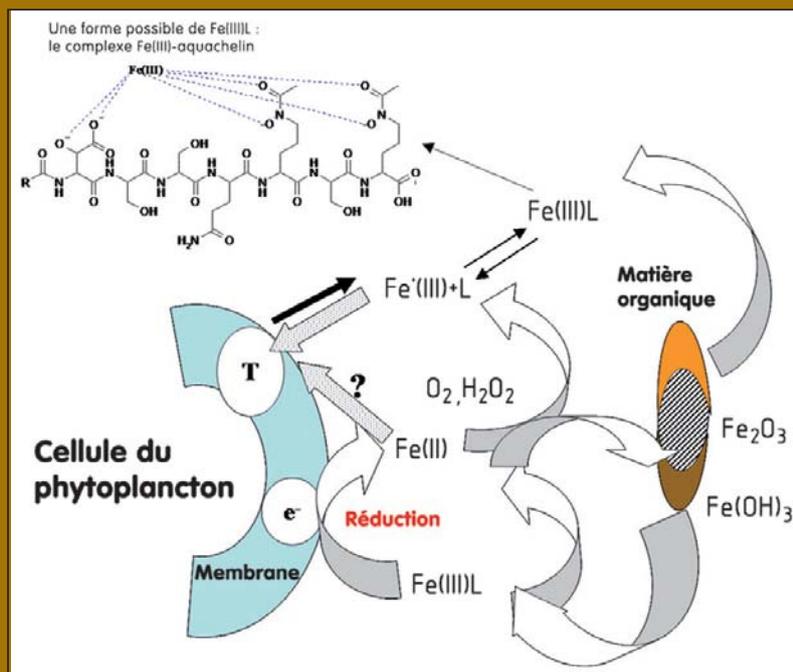


Figure 13

Interactions du fer dans l'eau de mer, sous différentes formes chimiques (flèches). Selon la forme où il se trouve, le fer pourrait être assimilé par des « transporteurs membranaires » (T) situés dans les membranes des cellules, après réduction ou non à leur surface.

LA CONVENTION DE LONDRES 1972

La convention de Londres est un texte majeur sur la protection de l'environnement marin vis-à-vis des activités humaines. Adoptée en 1972 par la Conférence intergouvernementale sur la Convention relative à l'immersion de déchets en mer, elle est entrée en vigueur en 1975. Parmi les étapes majeures qu'elle a franchies, figure l'interdiction, en 1993, de l'immersion des déchets faiblement radioactifs et de l'incinération des déchets industriels. Les efforts des adhérents sont soutenus par un secrétariat permanent accueilli par l'Organisation maritime internationale (OMI). Un Groupe scientifique sur l'immersion, composé d'experts gouvernementaux des Parties contractantes, répond à toutes les demandes scientifiques de la réunion consultative, en particulier pour la préparation de listes de substances dangereuses, le développement de lignes de conduites pour l'implémentation de la Convention, et l'information publique sur l'impact des différentes contaminations sur l'environnement marin.

rappeler que l'introduction de substances dans les océans est interdite, à moins de bénéficier de dérogations particulières (*voir Encart « La convention de Londres 1972 »*) ?

Le deuxième point important est la quantification du carbone soutiré à l'atmosphère. Cette mesure est fondamentale pour donner une valeur marchande au procédé, notamment dans le contexte « vendre des crédits carbone ». Dans l'état actuel des connaissances, elle semble extrêmement difficile à établir. Si la quasi totalité de la

communauté scientifique juge l'état de nos connaissances trop faible sur le sujet pour rendre un avis définitif sur les projets de géo-ingénierie, elle est cependant partagée sur la conduite à avoir dans le futur immédiat. Une partie de cette communauté semble disposée à poursuivre des recherches pour étudier les questions non résolues évoquées ci-dessus. Ceci impliquerait la réalisation d'expériences de fertilisation à plus grande échelle. Lors de ces expériences, une centaine de tonnes de fer pourrait être dispersée sur une surface d'environ 1000 km². Il est probable que ces expériences puissent être financées pour une part sur des fonds privés. De tels projets s'éloignent certainement d'un objectif de connaissance fondamentale du fonctionnement de l'océan et déplacent le questionnement quasi uniquement sur le champ de la faisabilité de la fertilisation en tant que technique de géo-ingénierie climatique. Pourtant, le cycle naturel du fer dans l'océan n'a certainement pas livré tous ses secrets, et les laboratoires naturels tel que celui de Kerguelen présentent encore un large potentiel pour de nouvelles découvertes. À suivre...

Bibliographie

- [1] Rapport du GIEC : Climate change 2007 : The Physical Science Basis. Source : www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_sgyr_fr.pdf.
- [2] Sigman D.M., Boyle E.A. (2000). Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide. *Science*, **407** : 859-869.
- [3] Martin J.H. (1990). Glacial interglacial CO₂ change : the iron hypothesis. *Paleoceanography*, **5** : 1-13.
- [4] Cassar N. *et al.* (2007). The Southern Ocean biological response to aeolian iron deposition. *Science*, **317** : 1067-1070.
- [5] Boyd P.W., Jickells T., Law C., Blain S., Boyle E.A., Buesseler K.O., Coale K.H., Cullen J.J., De Baar H.J.W., Follows M., Harvey M., Lancelot C., Levasseur M., Owens N.J.P., Pollard D.A., Rivkin R.B., Sarmiento J.L., Schoeman V., Smetacek V., Takeda S., Tsuda A., Turner D.R., Watson A. (2007). Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005 : Synthesis and future directions. *Science*, **315** : 612-617.
- [6] Blain S., Quéguiner B., Armand L., Belviso S., Bombled B., Bopp L., Bowie A., Brunet C., Brussaard K., Carlotti F., Christaki U., Corbière A., Durand I., Ebersbach F., Fuda J.L., Garcia N., Gerringa L.J.A., Griffiths F.B., Guigue C., Guillemin C., Jacquet S., Jeandel C., Laan P., Lefèvre D., Lomonaco C., Malits A., Mosseri J., Obernosterer I., Park Y.H., Picheral M., Pondaven P., Remenvi T., Sandroni V., Sarthou G., Savoye N., Scouarnec L., Souhault M., Thuillers D., Timmermans K.R., Trull T., Uitz J., Van-Beek P., Veldhuis M.J.W., Vincent D., Viollier E., Vong L., Wagener T. (2007). Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Nature*, **446(7139)** : 1070-1075.
- [7] www.whoi.edu/page.do?pid=14617.

Crédits photographiques

- Fig. 4 : Delphin Ruché / Institut polaire français Paul Émile Victor - IPEV www.institutpolaire.fr
- Fig. 6 : CNRS Photothèque / KEOPS / Leanne ARMAND.
- Fig. 7 : Service communication de l'Institut polaire français Paul Émile Victor - IPEV - www.institut-polaire.fr
- Fig. 9 : C. Law.
- Fig. 10 : Science 2007, www.mbari.org/expeditions/SOFEX2002/
- Fig. 12 : Blain S. *et al.*, (2007), Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Nature*, **446(7139)** : 1070-1075.