

## « Défis » pour l'océan

### 8.1. Le contexte

Que de progrès ont été accomplis en moins de deux siècles dans la connaissance des océans et des processus qui contrôlent les réalités physiques, chimiques et biologiques marines ! Bien au-delà des découvertes pionnières du *Challenger*, la physique de l'océan s'est affinée et les interactions des enveloppes liquide et gazeuse à l'échelle planétaire sont devenues des éléments-clés pour comprendre l'évolution climatique de la Terre.

L'océan est un système paradoxal. Les eaux de surface, où pénètre la lumière solaire, sont généralement pauvres en matières nutritives mais, grâce aux remontées d'eaux profondes à différentes échelles spatiales ou temporelles, elles sont le site majeur de la création des ressources biologiques. Les eaux profondes, obscures, sont riches en sels nutritifs (phosphates, nitrates, silicates), car elles minéralisent la « pluie organique » issue des eaux de surface.

Premier défi : la surpêche. L'exploitation des ressources biologiques concerne presque exclusivement les niveaux trophiques supérieurs. Ces ressources ont été largement exploitées au cours des siècles passés et, aujourd'hui, 30 % des espèces sont surexploitées et 60 % pleinement exploitées. Allons-nous vers *Une mer sans poissons ?* (Cury et Miserey 2008) où la solution sera *Mange tes méduses !* (Cury et Pauly 2013 ; Roux *et al.* 2013) ou pouvons-nous changer de cap et conduire cette exploitation dans le cadre d'un développement économique durable et d'une « économie bleue » (Garcia et Cochrane 2005 ; Cury *et al.* 2008 ; Cury *et al.* 2016 ; Link *et al.* 2017) ?

Deuxième défi : l'exploitation des ressources minérales de l'océan profond. À l'échelle de millions d'années, le plancher des océans est mobile. Dans cet ouvrage introductif du domaine « Océanographie et écologie marine » de l'encyclopédie

*Sciences*, nous avons seulement évoqué les relations entre phase liquide et solide de la planète Terre. La chaîne volcanique sous-marine, la dorsale océanique, totalise 60 000 kilomètres de longueur et culmine en moyenne à 3 000 mètres au-dessous du niveau de la mer. À la vitesse de quelques centimètres par an, le fond des océans s'éloigne symétriquement de cette chaîne pendant que des éruptions volcaniques se mettent en place à l'axe de la dorsale (Juteau 1993), générant des processus géothermaux qui s'accompagnent de la formation de dépôts métalliques (cobalt, nickel, terres rares, etc.) d'intérêt majeur pour diverses industries en pleine expansion au XXI<sup>e</sup> siècle.

Mais, contrairement à ce que l'on pensait avant le XIX<sup>e</sup> siècle, les fonds marins ne sont pas azoïques. Au contraire, ils sont le siège d'une grande biodiversité (Gjerde 2006). L'extraction des ressources minérales profondes, très perturbante pour l'environnement, est désormais envisagée. Si nous l'engageons, saurons-nous concilier exploitation des ressources minérales de l'océan profond et conservation de la biodiversité (Dyment *et al.* 2014) ?

Troisième défi : le changement climatique. L'océan joue un rôle majeur dans la régulation du climat à l'échelle planétaire. Il atténue l'effet de serre additionnel d'origine anthropique, en particulier en absorbant plus de 25 % de l'excès de gaz carbonique *via* les pompes physique et biologique de carbone. Dans les zones riches en sels nutritifs et pauvres en plancton, soit dans plus de 20 % de l'océan, la production photosynthétique de carbone, base de la pompe biologique, est limitée principalement par manque de fer dissous. John Martin, lors d'un colloque à Woods Hole en 1988, a proposé de les fertiliser artificiellement. À ce jour, plus d'une dizaine d'expériences de ce type ont été conduites avec succès, c'est-à-dire avec une diminution effective de la pression partielle de CO<sub>2</sub> au-dessus de la zone fertilisée (Baar *et al.* 2008). Devons-nous poursuivre dans cette voie ? Plus largement, devons-nous manipuler l'océan pour atténuer les effets du changement climatique (McGee *et al.* 2018) ?

## **8.2. Concilier exploitation des ressources biologiques et développement durable ?**

Au XIX<sup>e</sup> siècle, l'océan était vu comme une mer nourricière aux ressources halieutiques infinies. Thomas Huxley, biologiste, paléontologue et philosophe britannique, écrit à ce sujet en 1884 : « Probably all great sea-fisheries are inexhaustible ». Tragique erreur de diagnostic et d'anticipation. L'historien Jules Michelet, dans *La Mer* (1861), s'extasie quant à lui sur la fécondité océanique et clame son admiration pour les harengs (p. 102) :

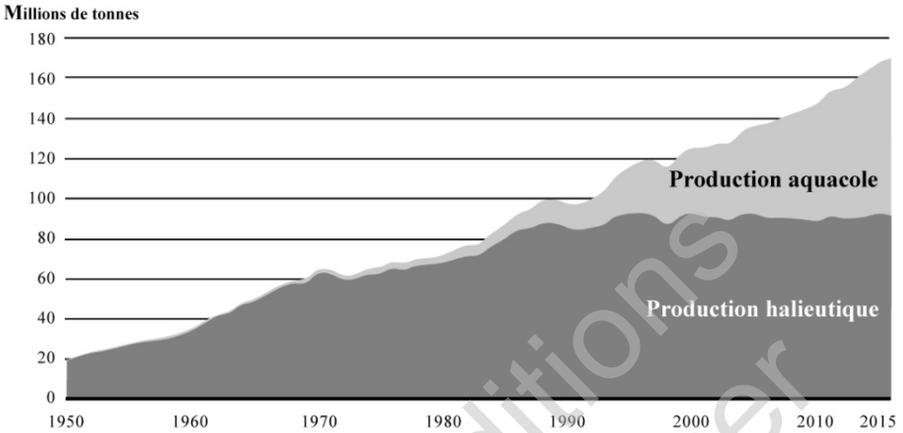
« Serrés, pressés, ils ne sont jamais assez près l'un de l'autre ; ils naviguent en bancs compacts [sic] [...]. Entre l'Écosse, la Hollande et la Norvège, il semble qu'une île immense se soit soulevée et qu'un continent soit près d'émerger [...]. Millions de millions, milliards de milliards, qui osera hasarder de deviner le nombre de ces légions ? »

Une dizaine d'années plus tard, Alexandre Dumas, dans son *Grand dictionnaire de cuisine* (1873), met en lumière le cabillaud que les Européens pêchent sur les bancs de Terre-Neuve. À la page 318, il devient lyrique à propos de leur abondance : « On a calculé que si chaque cabillaud venait à sa grosseur, il ne faudrait que trois ans pour que la mer fût comblée et que l'on pût traverser à pied sec l'Atlantique sur le dos des cabillauds. » Ces écrivains ignoraient évidemment que cette exceptionnelle fécondité est le seul moyen de survie dans l'immensité océanique où un nombre infime de larves arrive à l'état adulte et que cette abondance est seulement passagère.

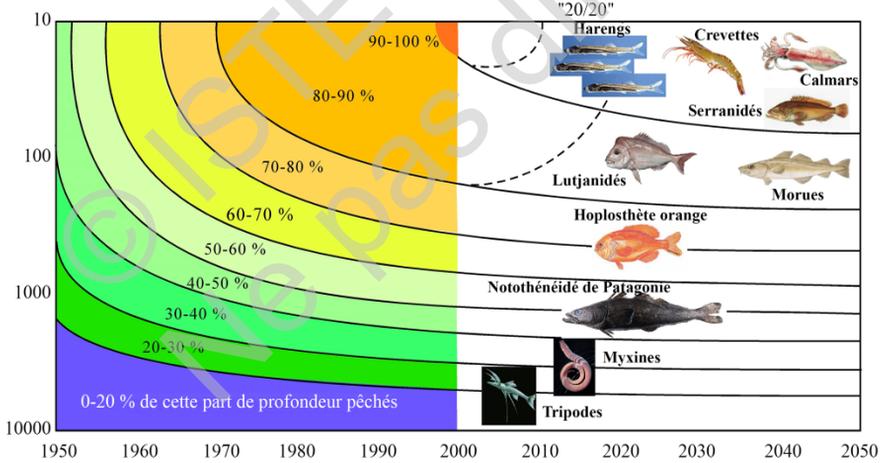
Les grandes pêcheries sont situées dans quatre régions marines (Atlantique du Nord-Est, Pacifique du Nord-Ouest, Pacifique du Centre-Ouest et Pacifique du Sud-Est) dont sont issus plus des deux tiers des captures mondiales. La longue histoire de ces pêcheries est celle d'une surexploitation jalonnée de brutales disparitions des stocks de certaines espèces. L'une des plus célèbres est celle du cabillaud (morue) des Grands Bancs de Terre-Neuve. Plus largement, les chutes de captures de cabillaud au large du Canada et dans l'Atlantique nord sont mises en évidence par la FAO (Food and Agricultural Organisation) (Sinclair et Page 1995). Cette zone est l'une des plus poissonneuses au monde après l'*upwelling* du Pérou (voir chapitre 3), caractérisé par un effondrement des captures d'anchois en 1972.

Les ressources biologiques varient en fonction des conditions climatiques et les variations de celles-ci se répercutent sur les captures d'espèces d'intérêt commercial (Overland *et al.* 2010). Ainsi, l'effondrement des pêches d'anchois au Pérou en 1972 coïncide-t-il avec une fluctuation climatique naturelle *El Niño* de grande ampleur. Pour revenir au cabillaud, Beaugrand *et al.* (2003) montrent également que le déclin des stocks dans l'Atlantique nord, plus particulièrement en mer du Nord, est certes lié à la surpêche, mais également au réchauffement des eaux de surface depuis la moitié de la décennie 1980 ; celui-ci a induit un décalage entre les abondances relatives des larves de cabillaud et de leurs proies favorites, en particulier le copépode *Calanus finmarchicus*.

Les captures mondiales stagnent depuis le début des années 1990 (voir figure 8.1), et si le tonnage en poissons destiné à l'alimentation humaine ou aux élevages continue à augmenter, c'est grâce à l'aquaculture, principalement en eau douce.



**Figure 8.1.** Évolution des pêches et de l'aquaculture au niveau mondial depuis la moitié du  $xx^e$  siècle (FAO 2018)



**Figure 8.2.** Expansion géographique et en profondeur des pêches ; en pointillé, l'effort à entreprendre pour revenir au niveau des années 1980 (Pauly et al. 2003)

### Mise en lumière de la surpêche



**Figure 8.3.** *Daniel Pauly*

Le biologiste Daniel Pauly (voir figure 8.3), né en France et élevé en Suisse romande, est l'un des meilleurs connaisseurs des ressources marines. Après un doctorat en biologie marine à l'université de Kiel en 1979, il développe, à l'International Center for Living Aquatic Resources Management aux Philippines, la plus grande base mondiale sur les poissons (*Fishbase* comprenant plus de 30 000 références).

Professeur au Fisheries Centre de l'université de Colombie-Britannique à Vancouver (il dirige ce laboratoire de 2003 à 2008), il commence à cartographier les captures de pêche sur tous les océans de manière à étudier leur impact sur les réserves marines en poissons. Il a reçu en 2005 le prix Cosmos, un équivalent du Nobel pour l'écologie.

Les concepts, méthodes et logiciels que Daniel Pauly a codéveloppés, documentés dans plus de 500 publications scientifiques ou d'intérêt général, sont utilisés à travers le monde. À l'heure actuelle, on est capable d'évaluer la « masse pêchable » de plus en plus rare (la biomasse halieutique). Cette surpêche est le fait de bateaux équipés par le Nord – ils effectuent des prélèvements massifs dans le Sud qui ne peut lutter avec sa seule flottille de pêche artisanale – pour une clientèle située d'abord en Europe et en Asie.

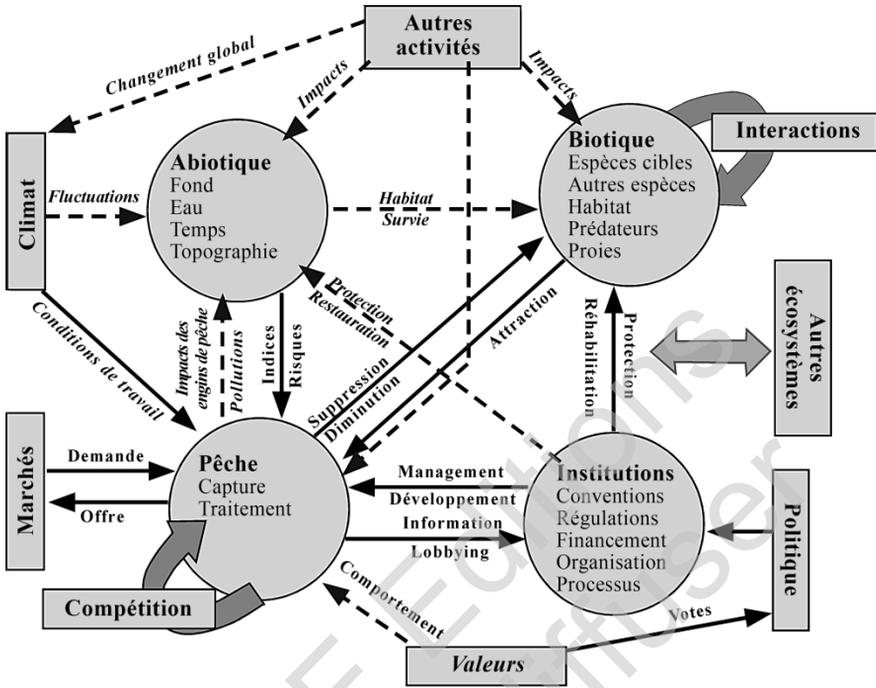
### **Encadré 8.1.** *Daniel Pauly (1946-)*

Pauly *et al.* (2003) montrent que, de 1950 à 2000, les pêcheries d'espèces benthiques et benthopélagiques ont surexploité les ressources des plateaux continentaux jusqu'à 200 mètres de profondeur puis sont descendues sous 1 000 mètres,

pendant que les pêches du thon océanique et des espèces proches se sont étendues à l'ensemble de l'océan au début des années 1980 (voir figure 8.2). Ces pêcheries capturent les espèces à un niveau trophique de plus en plus bas (Pauly *et al.* 2002 ; Essington *et al.* 2006). La sélection des espèces de poissons par taille a déjà induit des changements génétiques et pourrait affecter leur évolution (Belgrano et Fowler 2013). Extrapolant les tendances des captures mondiales jusqu'à 2050, Pauly estime que, compte tenu de la puissance des moyens satellitaires et des systèmes d'imagerie *in situ* disponibles ou en élaboration, nous parviendrons sans difficulté à totalement épuiser les ressources biologiques des pentes continentales et au-delà.

Dans la même ligne, si rien ne change dans nos pratiques actuelles en matière d'halieutique et de perturbations des eaux côtières, Worm *et al.* (2006) prévoient que les espèces les plus couramment pêchées aujourd'hui (colin d'Alaska, anchois du Pérou, thon rouge, sardine, maquereau, hareng, cabillaud) pourraient avoir disparu en 2048, ce qui est contesté par Branch (2008). Worm nuance ces prévisions et met en avant une stratégie de management des pêches visant à la reconstitution des stocks. Considérant dix aires de pêches importantes, Worm et Branch (2012), à l'aide de modèles d'écosystèmes, déterminent la proportion maximale de stocks de poissons pouvant être pêchée sans menacer le renouvellement des stocks (« Rendement maximum durable » ou *Multi-species Maximum Sustainable Yield*). Lorsque, dans un écosystème, les captures se situent sous ce rendement, les stocks de poissons se reconstituent. Ces auteurs montrent que cinq des systèmes autrefois surexploités sont désormais en rebond : Islande, Terre-Neuve et Labrador, nord-est du plateau continental des États-Unis, sud-est du plateau continental de l'Australie et courant de la Californie. Pour y parvenir, les pêcheries de ces systèmes ont utilisé différentes pratiques de gestion traditionnelle, y compris des restrictions sur les engins, des zones fermées et des réductions de quotas. Toutefois, environ les deux tiers des stocks mondiaux d'intérêt commercial restent actuellement exploités au-delà de leur rendement maximal durable.

Dans un contexte de pression croissante sur les ressources halieutiques (consommation humaine, élevage) en raison de l'accroissement de la population mondiale, le mode dominant de gestion des pêches est basé sur des mesures de conservation de la capacité productive et reproductive des stocks (Troadek et Boncœur 2003), notamment les TAC (Totaux Autorisés de Capture), généralement associés à des régulations sur les engins de pêche. Ce type de gestion a échoué dans de nombreux cas. Les enjeux financiers sont considérables (World Bank 2017) et il est urgent de mettre en place une gestion durable des ressources halieutiques (voir figure 8.4). Différents modes alternatifs de la gestion des pêcheries sont envisageables, allant de l'approche habituelle à un mode privilégiant le renouvellement maximum des stocks sur le long terme, ou, au contraire, maximalisant le profit à court terme (Costello *et al.* 2016).



**Figure 8.4.** Composantes de l'écosystème et interactions impliquées dans l'approche écosystémique des pêches (Garcia et al. 2003)

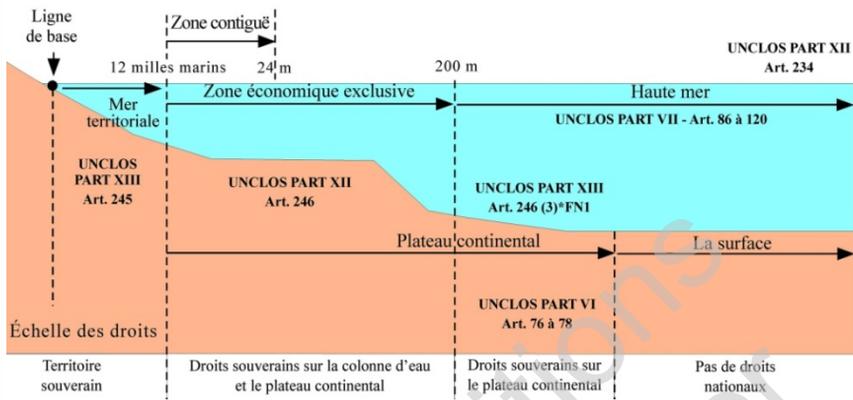
Une approche particulièrement intéressante de la gestion des pêches dite AEP (Approche Écosystémique des Pêches) s'est progressivement développée (Cury *et al.* 2016) sous l'égide de trois entités internationales émanant de l'ONU (voir encadré 8.2) : la CNUDM (ou UNCLOS en anglais), l'UNCED, et le comité des pêches de la FAO. La Convention sur la Diversité Biologique (CDB) et l'Agenda 21, signés lors du sommet de la Terre à Rio en 1992, complètent ces dispositifs fondateurs (Fromentin *et al.* 2007).

### Traités et organismes internationaux sur le droit de la mer et la biodiversité, par ordre chronologique

Le comité des pêches de la FAO de l'ONU (1965) traite des questions halieutiques.

La Convention de Londres sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets, signée en 1972, ne traite pas directement de géo-ingénierie. Toutefois, le protocole de 1996 annexé à cette convention a été amendé : 1) en 2006 pour définir les conditions de non-violation du protocole lors du stockage de CO<sub>2</sub> en réservoir

géologique sous-marin, et ; 2) en 2008 pour affirmer que la fertilisation océanique dans le cadre d'études scientifiques ne constituait pas une violation du protocole.



**Figure 8.5.** Zones maritimes définies par l'UNCLOS

La Convention des Nations unies sur le droit de la mer (CNUDM) a défini différents types de législation ou de règlements pour l'exploitation des ressources naturelles et la prévention des pollutions (voir figure 8.5) dans les différentes zones maritimes.

Le règlement adopté par l'Assemblée générale de l'ONU en 1973 demande aux parties signataires (dont la France) de « prendre séparément ou conjointement [...] toutes les mesures compatibles avec la Convention nécessaires pour prévenir, réduire et maîtriser la pollution du milieu marin, quelle qu'en soit la source [...] ».

La Conférence des Nations unies pour l'environnement et le développement (1992) traite des questions halieutiques.

La Convention sur la diversité biologique et l'Agenda 21, signés lors du sommet de la Terre de Rio en 1992, traitent des questions halieutiques et des impacts de la géo-ingénierie. Les parties de cette convention ont statué en 2008 sur un moratoire sur la fertilisation des océans, excluant les expériences scientifiques à petite échelle en milieu côtier. Ce moratoire a été réaffirmé par les parties de la CDB en 2010. Les efforts visant à élaborer une réglementation juridiquement contraignante pour la protection de l'espace marin international se poursuivent.

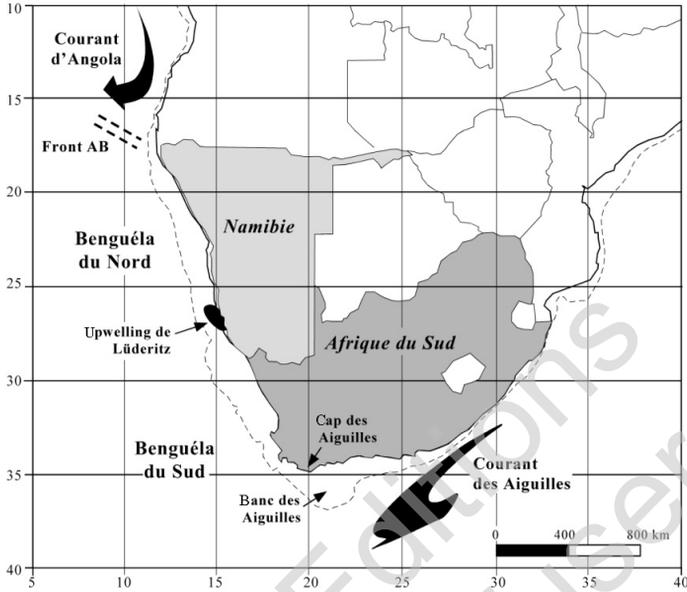
L'Organisation maritime internationale a adopté en 2012 un cadre de réglementation pour l'évaluation des propositions d'expériences à petite échelle sur l'océan.

**Encadré 8.2.** Textes et conventions traitant de l'exploitation des ressources marines et de la manipulation de l'océan

L'AEP est une approche interdisciplinaire qui privilégie les interactions entre les composantes de l'écosystème et intègre le contexte socio-économique de l'exploitation des espèces d'intérêt commercial (FAO 2002 ; Sinclair et Valdimarsson 2003 ; Fromentin *et al.* 2007 ; Cury *et al.* 2008 ; Cury *et al.* 2016 ; Gascuel 2019). Comparé au paradigme classique de l'halieutique, l'AEP élargit les champs de recherche et d'expertise de la population exploitée (stocks) à l'ensemble de l'écosystème, du système ternaire « pêche - administration - science » au système quaternaire « pêche - administration - science - société civile », du court terme opérationnel au long terme stratégique d'une approche sectorielle à une approche intersectorielle et spatiale, et de la durabilité du secteur à la contribution du secteur au développement durable. L'AEP est envisagée ou déjà pratiquée dans plusieurs aires maritimes sous la houlette du Canada – secteur Pacifique (Molua 2015) –, des États-Unis – courant de Californie, golfe du Mexique, plateau continental du nord-est, Alaska et îles du Pacifique (NOAA 2017) –, de l'Union européenne (Parlement européen 2008), et de l'Afrique du Sud. Elle pourrait être prise en considération pour une gestion optimale des pêches en Asie et dans le Pacifique (Fletcher *et al.* 2016 ; Heenan *et al.* 2015).

Deux exemples décrits par Cury permettent de comprendre en profondeur comment des projets d'AEP sont conçus puis mis en œuvre. Le premier concerne la zone de pêche du courant du Benguela (écosystèmes d'Afrique du Sud, de Namibie et d'Angola, voir figure 8.6), qui est soumise à des fluctuations climatiques affectant directement le fonctionnement des écosystèmes côtiers. Ces fluctuations ont d'importants impacts sur la pêche de petits pélagiques (anchois *versus* sardines) et d'autres types de captures pélagiques ou benthiques. Elles se traduisent par le déplacement géographique des zones de pêche sur des milliers de kilomètres, avec des conséquences marquées sur la vie et des migrations de populations. À noter que la surpêche des petits pélagiques peut provoquer d'importants déséquilibres trophiques avec, dans le cas de la Namibie, des envahissements massifs par les méduses (Roux *et al.* 2013).

Pour mieux gérer à la fois les conséquences des fluctuations naturelles et les impacts anthropiques, un projet interdisciplinaire a été lancé en 2010. Son élaboration a impliqué de nombreux acteurs : des scientifiques, des représentants du secteur économique et plus largement des populations concernées par cette ressource biologique, et a duré trois ans (Paterson *et al.* 2010). Ses conclusions (Augustyn *et al.* 2014) proposent notamment l'adoption d'une méthode d'évaluation des risques écologiques et la mise en place d'une « alliance pour une pêche responsable » entre de grandes sociétés de pêche et la fondation WWF (World Wildlife Fund), en collaboration avec d'autres ONG et le gouvernement sud-africain. Un des éléments-clés de la réussite des actions entreprises est la formation des acteurs économiques et sociaux.

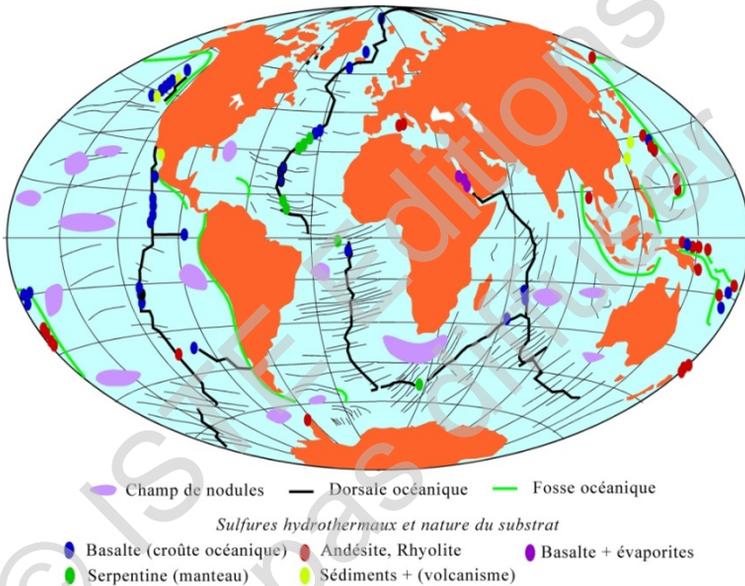


**Figure 8.6.** Zones de pêche du courant du Benguela concernées par un projet d'AEP en cours d'implémentation (Roux et al. 2013)

Le deuxième exemple est relatif à l'écosystème côtier péruvien du courant de Humboldt réputé pour sa variabilité à l'échelle interannuelle générée par des processus à grande échelle (El Niño, La Niña, voir section 3.8). Cette variabilité naturelle combinée aux effets de la surpêche peut avoir des conséquences majeures sur les tonnages capturés par les pêcheries, les revenus des populations locales et, ce qui est en général moins connu, sur l'abondance de l'avifaune marine productrice de guano, ressource économique depuis des siècles. Pour éviter la surexploitation des stocks, les pêcheries d'anchois sont gérées depuis 2009 de manière centralisée avec l'attribution de quotas individuels et une limitation de la durée de la saison de pêche. Quotas et durée de pêche sont ajustés selon les fluctuations climatiques relativement prévisibles plusieurs mois à l'avance. La pêche industrielle est strictement interdite au-delà de cinq milles au large du rivage. Ce mode de gestion inspiré de la démarche AEP gère les ressources de poissons déterminées au préalable à l'aide de méthodes acoustiques (voir figure 8.7) et, les déplacements des navires de pêche étant suivis en temps réel, il garantit la transparence entre acteurs économiques. Une des originalités de ce mode de gestion est de concilier conservation et exploitation en organisant la protection, dans un rayon de vingt-cinq kilomètres autour de leurs colonies, des oiseaux (fous de Bassan et cormorans) producteurs de guano, compétiteurs des pêcheurs pour les petits poissons pélagiques, tel l'anchois (Cury et al. 2016).



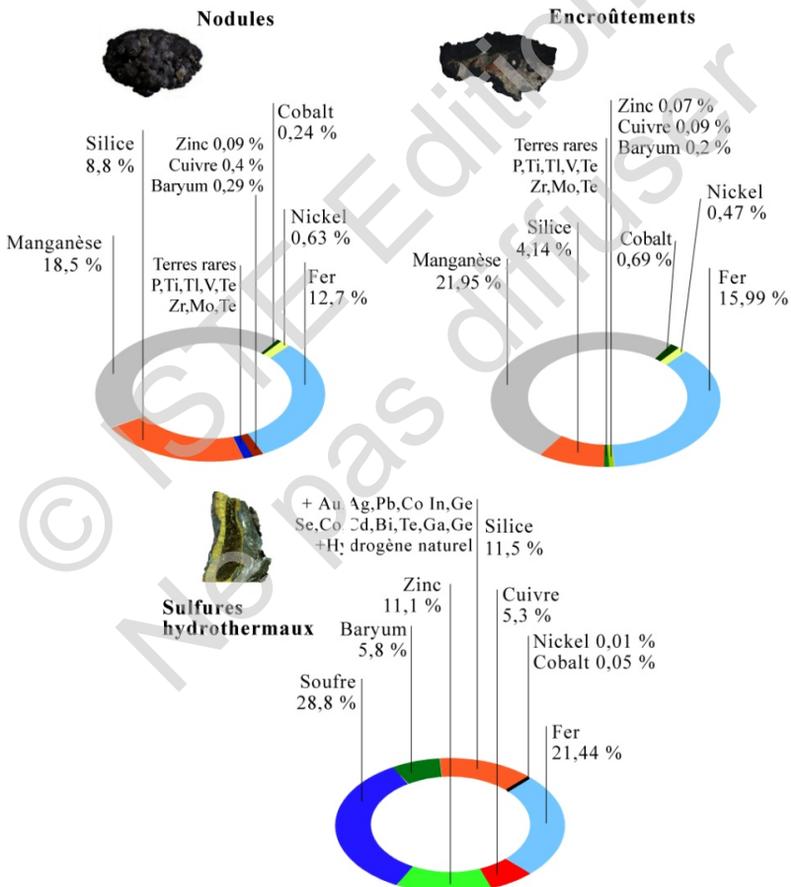
plus spectaculaires manifestations de l'activité hydrothermale se localisent autour des « fumeurs noirs ». Ici, à 3 000 mètres, dans un environnement où la température est habituellement de 2 °C, des micro-environnements voient leur température atteindre 350 °C (von Damm *et al.* 2001). L'activité hydrothermale sous-marine est à l'origine de la formation de dépôts de sulfures polymétalliques au niveau des dorsales océaniques (voir figure 8.8). Ces sulfures sont principalement riches en métaux de base (cuivre, zinc, plomb), en métaux précieux (argent et or) mais aussi éventuellement en éléments plus rares (indium, sélénium, germanium) (Dyment *et al.* 2014). Mais ce ne sont pas les seuls dépôts intéressants pour une exploitation minière.



**Figure 8.8.** Localisation des principaux champs à nodules et zones à encroûtements ainsi que les principaux sites hydrothermaux dans les grands fonds océaniques (Dyment *et al.* 2014, p. 47)

Des nodules polymétalliques riches en manganèse, cobalt et cuivre sont échantillonnés pour la première fois au XIX<sup>e</sup> siècle, lors de la campagne du *Challenger*. La genèse de ces nodules et leur enrichissement en métaux impliquent des processus variés se déroulant à une échelle de temps de l'ordre du million d'années (Bonatti et Nayudu 1965) : précipitation de métaux de l'eau de mer (processus hydrogéné), remobilisation du manganèse dans la colonne sédimentaire (processus diagénétique), dérivation de métaux des sources hydrothermales associées à une activité volcanique, décomposition de débris basaltiques par l'eau de mer (processus halmyrolitique),

précipitation d'hydroxydes métalliques au travers de l'activité de micro-organismes (processus biogénique, avec concrétion d'ions métalliques sur un germe tel qu'un fragment de roche ou un résidu biogène type dent de requin, radiolaire ou foraminifère). Répartis sur le cinquième de la surface des océans, ces nodules sont plus abondants en zones océaniques à faible taux de sédimentation, et, en général, sur des fonds abyssaux dépassant 5 000 mètres. La zone la plus riche en nodules est située dans le Pacifique nord, des îles Hawaï à la Californie, entre 10 et 20° de latitude nord. Pendant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, ces nodules sont considérés comme des curiosités géologiques, mais, après les années 1950 (Mero 1960, 1965), ils font l'objet d'inventaires en vue d'une éventuelle exploitation. La composition chimique des nodules varie selon le type, la taille et les caractéristiques du noyau du nodule.

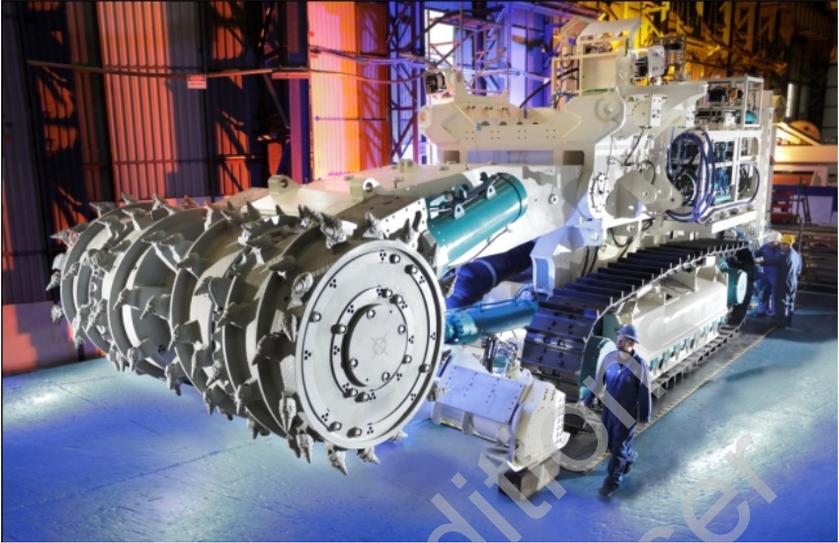


**Figure 8.9.** Composition en éléments majeurs (pourcentage en poids) dans les minéralisations des grands fonds océaniques (Ifremer 2011)

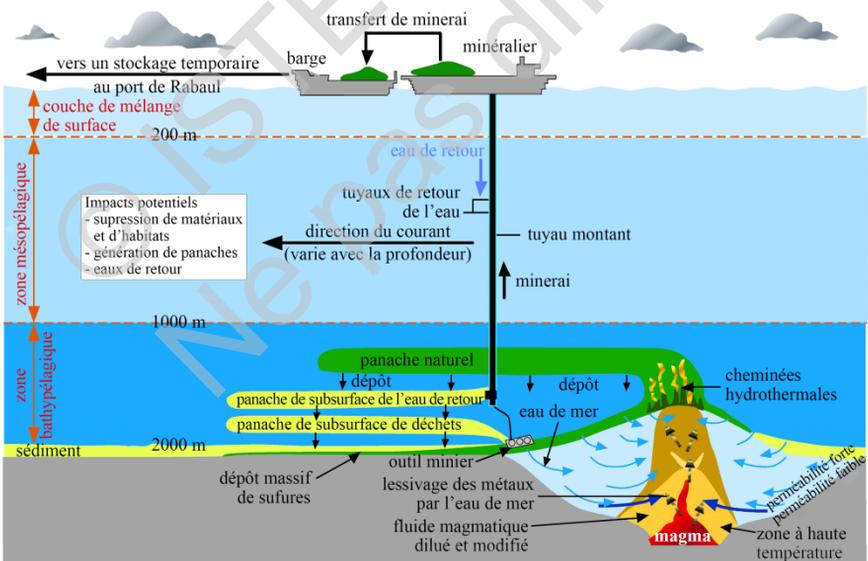
Les nodules des dépôts métallifères profonds sous forme d'encroûtements contiennent du manganèse (27-30 %), du nickel (1,25-1,5 %), du cuivre (1-1,4 %) et du cobalt (0,2-0,25 %). Les autres composants (voir figure 8.9) incluent le fer (6 %), le silicium (5 %) et l'aluminium (3 %), avec de plus faibles quantités de calcium, de sodium, de magnésium, de potassium, de titane, de vanadium, de baryum, d'hydrogène et d'oxygène. Si tout le thallium contenu dans les nodules était collecté, les réserves mondiales seraient multipliées par six mille ! Les réserves océaniques en nickel contenues dans les nodules sont du même ordre de grandeur que les réserves continentales (Couper 1983). Dans le Pacifique nord, la zone Clarion-Clipperton-Zone fait l'objet de nombreux permis d'exploration représentant chacun 75 000 kilomètres carrés (Dyment *et al.* 2014) ; la masse totale de nodules y est estimée à 27 milliards de tonnes (Voosen 2019). Les encroûtements cobaltifères sont principalement associés aux volcans et aux monts sous-marins. Repérés à des profondeurs variant de 400 à 4 000 mètres, ils ont jusqu'à vingt-cinq centimètres d'épaisseur et couvrent des surfaces de plusieurs kilomètres carrés. La surface totale de ce type de dépôts est estimée à 6,35 millions de kilomètres carrés, soit 1,7 % de la surface des océans.

Une attention particulière est accordée depuis le début du XXI<sup>e</sup> siècle aux terres rares, éléments qui occupent une place à part dans le tableau de Mendeleïev. Il s'agit d'un groupe de métaux aux propriétés voisines, comprenant le cérium, le scandium, l'yttrium et les lanthanides, chimiquement réactifs aux températures élevées. Leurs propriétés électromagnétiques proviennent de leur configuration électronique, avec remplissage progressif de la sous-couche 4f, à l'origine du phénomène appelé « contraction des lanthanides ». Leur utilisation dans l'industrie s'est spectaculairement développée pour les pots catalytiques, les ampoules basse consommation et le développement des éoliennes et des batteries. Les minerais de terres rares sont abondants, en particulier en Chine (qui assure 95 % de la production mondiale et détient 36 % des réserves continentales). Les fonds marins, notamment autour des archipels d'Hawaï et de la Polynésie, recèlent d'importantes quantités de terres rares (Kato *et al.* 2011). Cependant, les dépôts marins sont cinquante fois moins riches que les gisements terrestres. Un dépôt massif a été mis en évidence au large du Japon (Takaya *et al.* 2018).

Les technologies actuelles permettent-elles l'exploitation des ressources minières profondes ? Les sociétés minières ont mis au point des robots excavateurs (voir figure 8.10) capables d'opérer à des centaines de mètres, voire au-delà de mille mètres de profondeur. Des projets d'exploitation existent notamment pour une mine située au large de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, riche en cuivre, en or, en zinc et en argent, et pour l'extraction des nodules riches en cobalt de la zone Clarion-Clipperton (Voosen 2019) à partir de prototypes de collecteur Patania II lié à un navire de surface.

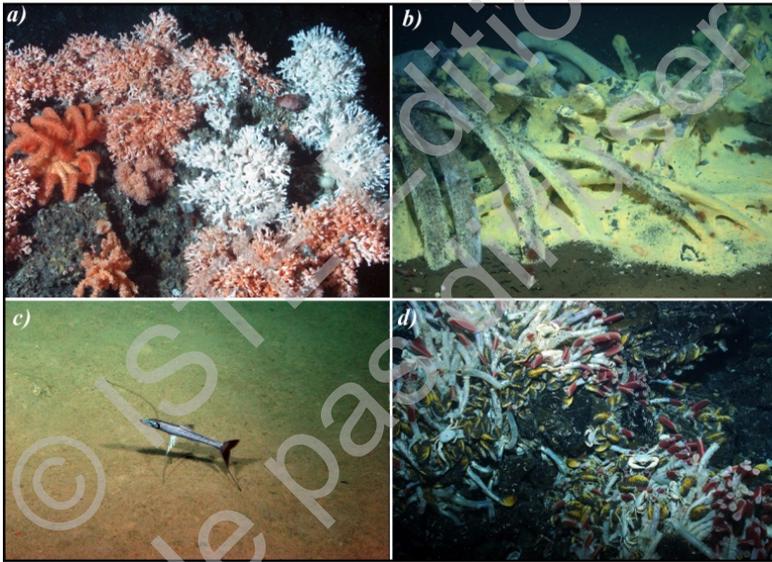


**Figure 8.10.** Robot extracteur de minerais du consortium international Nautilus pouvant opérer à 1 600 mètres de profondeur (© Nautilus Minerals)



**Figure 8.11.** Schéma montrant le processus minier proposé pour le site Solwara 1 au large de la Papouasie–Nouvelle-Guinée par la compagnie canadienne Nautilus Minerals et ses impacts potentiels (Collins et al. 2013)

Indépendamment de l'impact local sur le lieu d'extraction, une activité d'extraction minière peut générer des panaches de matières en suspension impactant à grande distance les fonds marins (voir figure 8.11). Le problème vient du fait que le fond des océans n'est pas abiotique, mais qu'il accueille une mosaïque d'habitats (voir figure 8.12). En dehors du cas particulier des écosystèmes hydrothermaux où la matière organique est générée sur place à partir de processus chimiosynthétiques (voir chapitre 5), pour les autres habitats profonds, les organismes présents reçoivent leur nourriture *via* le flux de matières organiques exportées depuis la surface des océans. Cette exportation est limitée dans le temps ; pour survivre, les organismes des habitats profonds (Thurber *et al.* 2014) doivent être capables de s'adapter à des apports transitoires et parfois intenses de matières organiques puis à des périodes caractérisées par des diètes absolues.



**Figure 8.12.** Le fond des océans accueille une mosaïque d'habitats (© Ifremer, sauf pour la b), avec l'aimable autorisation de Craig Smith (Smith *et al.* 2015)

COMMENTAIRE SUR LA FIGURE 8.12.— a) Récif corallien profond au sud de l'Islande ; b) un cadavre de baleine dans le bassin Santa Cruz sur la marge californienne par 1 674 mètres de fond (après sept années passées au fond, c'est le stade du soufre : sur des tapis blanc et jaune de bactéries sulfo-oxydantes apparaissent des anémones, des palourdes, des crevettes, des tubes d'annélides polychètes) ; c) poisson-trépied *Bathypterois sp.* sur le fond du canyon du Var en 2007 ; d) ver *Riftia pachytila* sur la dorsale pacifique en 2012.

Les bouleversements liés au brassage, grattage et autres modifications physico-chimiques de l'exploitation minière pourraient irrémédiablement déstabiliser ces écosystèmes et leur biodiversité. En raison de la basse température des eaux profondes, les écosystèmes abyssaux présentent un métabolisme lent. On connaît mal le temps de réaction aux perturbations d'animaux souvent pluricentennaires, mais, *a priori*, leur temps de réaction, donc de résilience habituelle, devrait être très long. Si le total d'espèces connues sur la planète Terre est de 1 800 000, le nombre d'espèces répertoriées pour l'océan serait de 243 000 (Costello et Chaudary 2017), nombre qui pourrait être largement sous-estimé (Mora *et al.* 2011). Ainsi, pour la zone Clarion-Clipperton, 330 espèces, dont les deux tiers sont jusqu'à présent méconnus, ont été répertoriées sur trente kilomètres carrés (voir chapitre 4). Les écosystèmes profonds sont les plus étendus au niveau planétaire et on peut présumer qu'ils abritent une grande part de la biodiversité totale de la planète Terre (Loreau 2008 ; Zeppilli *et al.* 2016). La conservation de cette biodiversité devrait être une priorité dans la perspective d'un développement économique durable (Danovaro *et al.* 2008 ; Danovaro 2009).

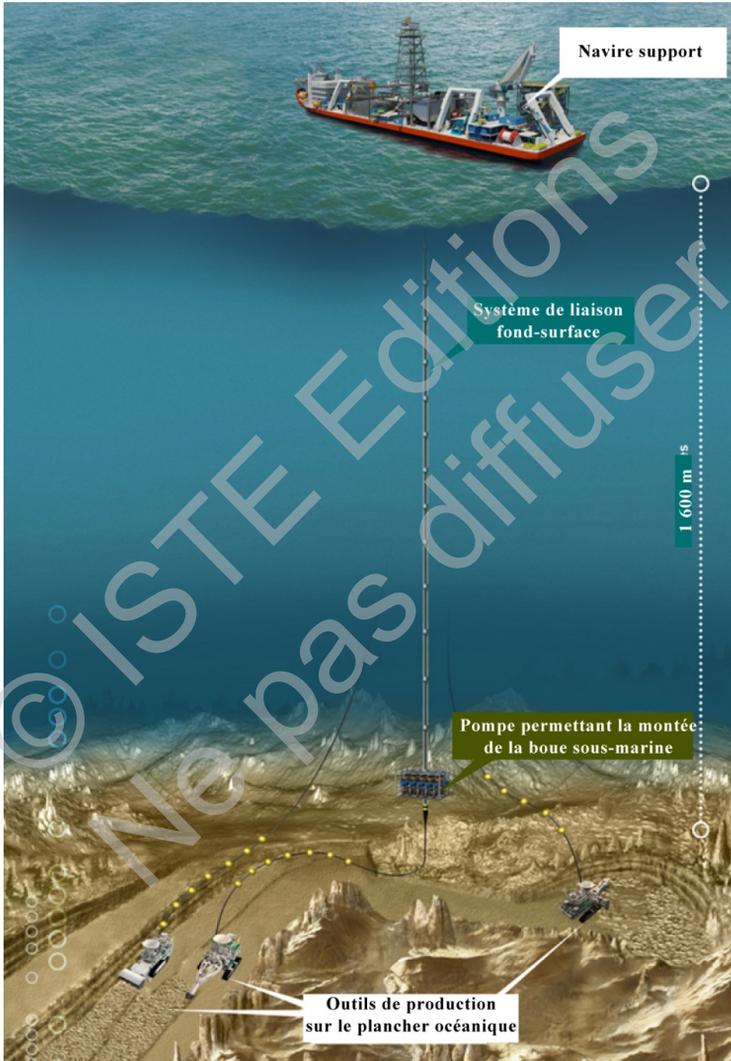
Dans le cadre de la promotion de la « croissance bleue » (EMB 2015), la Commission européenne supporte financièrement différents projets d'évaluation des impacts environnementaux d'extraction minière sous-marine ou de production d'énergie (par exemple, le projet Midas<sup>1</sup>). Que faire ?

La démarche adoptée est proche de celle développée pour les ressources biologiques. Industriels et scientifiques ont coopéré pour l'élaboration d'un code minier des fonds marins. Le cadre juridique est contraint par quelques textes de référence (voir encadré 8.2) qui considèrent les ressources minérales marines comme un « bien commun de l'humanité ». Le droit de la mer distingue l'espace maritime en ZEE (Zone Économique Exclusive), appartenant aux pays riverains, des eaux internationales. Au-delà de la ZEE, le plancher océanique forme la « zone internationale des fonds marins ». Cet espace est géré par l'Autorité Internationale des Fonds Marins (AIFM), organe créé par l'UNCLOS. Cette autorité, basée à Kingston (Jamaïque), est censée gérer les fonds marins internationaux « à des fins exclusivement pacifiques » et « dans l'intérêt de l'humanité tout entière ». L'AIFM prévoit toutefois la possibilité d'explorer et bientôt d'exploiter les ressources minérales de ces fonds. Les phases de prospection, qui ne nécessite pas de permis, et d'exploration des nodules polymétalliques, des sulfures hydrothermaux et des encroûtements, sont encadrées par des règlements adoptés respectivement en 2000, 2010 et 2012. Quant aux règles d'exploitation minière à des fins commerciales, elles ne devraient pas être finalisées avant 2021.

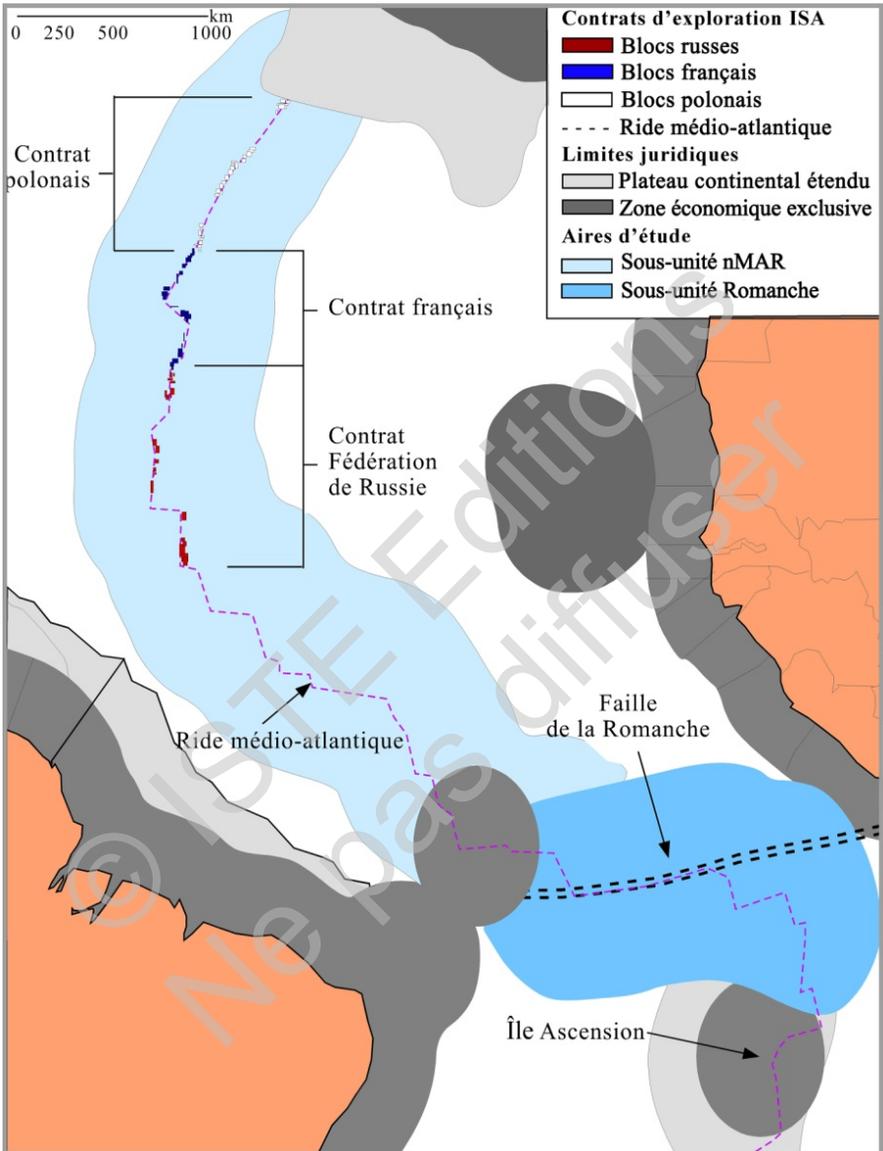
---

1. [www.eu.midas.net](http://www.eu.midas.net).

L'AIFM a déjà accordé une vingtaine de contrats permettant à des États et à des compagnies minières privées d'explorer les fonds marins internationaux, principalement dans le Pacifique. Un des dispositifs envisagés pour l'exploitation minière abyssale prévoit de limiter au maximum la dispersion de matières particulaires dans l'océan (voir figure 8.13).



**Figure 8.13.** Exploitation minière au fond des océans prévoyant une remontée de minerais sans dispersion de matériel particulaire dans l'océan (© Nautilus Minerals)



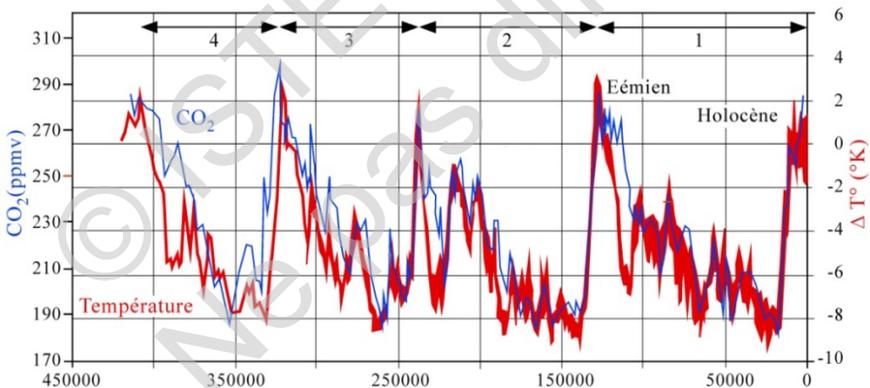
**Figure 8.14.** Zones de dépôts massifs de sulfures métalliques au niveau de la dorsale médio-atlantique en zone équatoriale. Identification de zones (sous-unités) pour lesquelles des critères objectifs permettant de préciser la notion de conservation de la biodiversité (Dunn et al. 2018).

Un premier chantier d'exploitation minière est envisagé à court terme au nord de la Papouasie-Nouvelle Guinée. Il n'est pas certain que les règlements mentionnés dans l'encadré 8.2 suffisent à garantir l'intégrité des écosystèmes profonds dans les zones d'exploitation, certains risques semblant ignorés par les exploitants potentiels ou du moins largement minimisés. Aussi Dunn *et al.* (2018), tenant compte de critères promulgués par la Convention sur la diversité biologique, proposent-ils un ensemble de paramètres (indicateurs d'habitats et de biodiversité, paramètres environnementaux) permettant de rendre objective la notion de conservation de la biodiversité. Cette démarche est explicitée dans le cas de la zone de dépôts massifs de sulfures de la dorsale atlantique en zone équatoriale, pour laquelle de nombreux permis d'exploration ont été accordés (voir figure 8.14). Ceci pourrait conduire à l'identification de zones réserves de biodiversité où l'extraction minière devrait être interdite.

Exploiter les ressources minières de l'océan profond sans perturbation de leur biodiversité reste un vrai challenge pour le XXI<sup>e</sup> siècle (Niner *et al.* 2018).

## 8.4. Atténuer l'effet de serre anthropique en manipulant l'océan ?

### 8.4.1. Au XIX<sup>e</sup> siècle



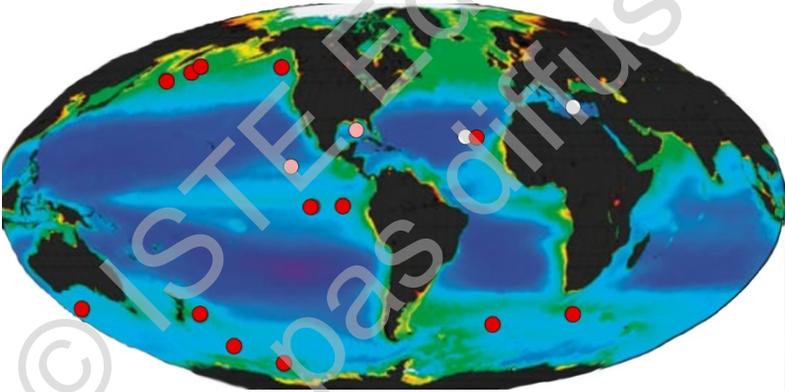
**Figure 8.15.** Variations de la température et de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère établies à partir d'archives glaciaires pour les quatre derniers cycles climatiques

Svante Arrhenius, chimiste suédois, est connu pour avoir établi la loi éponyme, qui permet de quantifier la variation de la cinétique des réactions chimiques en fonction de la température. Il s'est rendu célèbre en présentant, en 1895, une communication à la Société de physique de Stockholm intitulée « Sur l'influence de

l'acide carbonique dans l'air sur la température du sol ». Cette communication paraît en avril 1896 dans la revue *Philosophical Magazine and Journal of Science* publié à Londres, Édimbourg et Dublin. Le budget d'énergie à l'échelle planétaire tient compte de l'effet radiatif du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau de l'atmosphère, démontrant que ces constituants mineurs de l'atmosphère jouent un rôle majeur dans le bilan énergétique. Arrhénius conclut ainsi :

« Si la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère était multipliée par 2,5 à 3, la température des régions arctiques augmenterait de 8 à 9 °C. À l'inverse, lorsque la teneur en CO<sub>2</sub> diminue de 38 à 45 %, la température dans la zone de latitude comprise entre le 40° et le 50° parallèle nord s'abaisse de 4 à 5 °C, provoquant un âge glaciaire. » (Voir figure 8.15.)

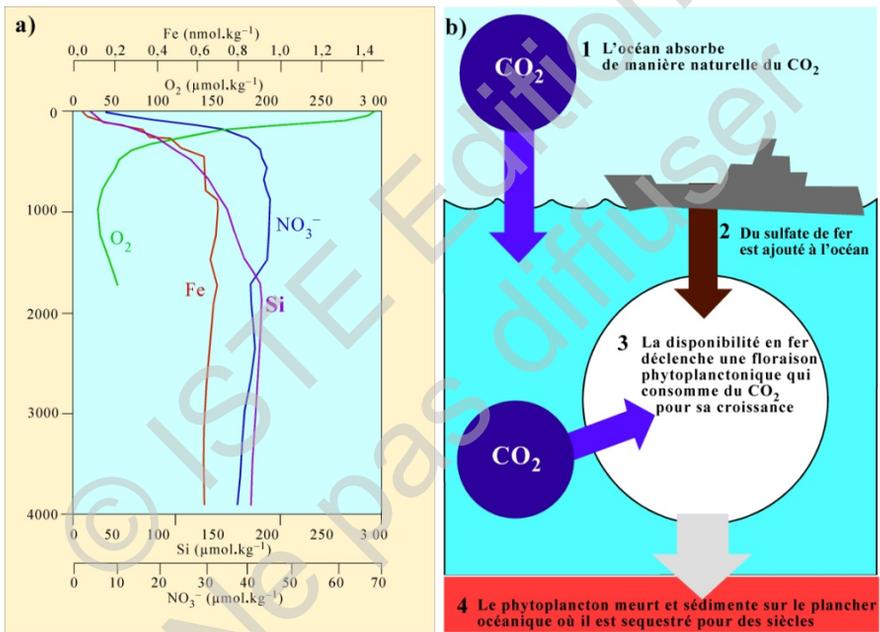
#### 8.4.2. Un demi-tanker chargé de fer...



**Figure 8.16.** Distribution de la teneur annuelle moyenne en chlorophylle a à la surface de l'océan (données SeaWiFS). Les zones riches en sels nutritifs mais pauvres en fer, donc à faible biomasse (bleu et bleu foncé), ont fait l'objet de treize expériences de fertilisation en fer (points rouges). Deux essais du même type à des fins commerciales ont également été conduits (points roses), ainsi que deux essais de fertilisation en phosphates (points blancs) (Wallace et al. 2010).

En juillet 1988, lors d'une conférence dans une des plus célèbres stations marines, la WHOI dans le Massachusetts, John Martin s'exclame : « Donnez-moi un demi-pétrolier chargé de fer et je vous ferai un âge glaciaire. » (Voir encadré 8.3.) Il entre ainsi dans la légende, d'autant qu'en 1990 il attribue aux apports de fer à l'océan Austral les variations du CO<sub>2</sub> atmosphérique entre une ère glaciaire et une ère

interglaciaire (voir figure 8.15). Puis il teste son hypothèse dans le Pacifique équatorial (Martin *et al.* 1994), où de vastes zones, riches en sels nutritifs, demeurent bleues, donc pauvres en phytoplancton, parce qu'elles sont carencées en fer. Ces zones HNLC (voir figure 8.16) occupent plus du tiers de la surface océanique totale. Le génie de John Martin est non seulement de vérifier son hypothèse de la carence par des expériences de laboratoire, ce qui est rapidement réalisé, mais de passer à des expériences de fertilisation artificielle de l'océan, en déversant du sulfate de fer dans les aires océaniques HNLC pour augmenter leur production phytoplanctonique, « pomper » au moins partiellement l'excès de  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère, et transférer du carbone organique vers l'océan profond (voir figure 8.17) où le  $\text{CO}_2$  régénéré est séquestré pour plusieurs centaines d'années, voire plus de mille ans.

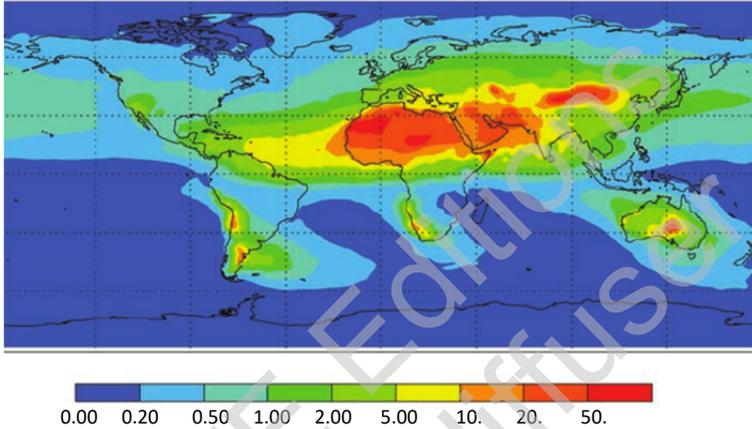


**Figure 8.17.** Représentation schématique de l'hypothèse du fer de John Martin (© Carrington, 2012, The Guardian)

COMMENTAIRE SUR LA FIGURE 8.17.– a) Dans les zones HNLC (profils verticaux typiques des sels nutritifs et du dioxygène), les eaux de surface sont épuisées en fer dissous, ce qui limite la production photosynthétique (Coale 2011) ; b) l'ajout de fer dissous favorise la production photosynthétique, ce qui entraîne une exacerbation de l'exportation de carbone vers l'océan profond. L'ajout d'une mole de fer se traduirait par la génération de 106 000 moles de carbone.

### 8.4.3. Fertilisations artificielles

Les eaux de surface sont enrichies en fer dissous par les déversements fluviaux, les apports éoliens (voir figure 8.18) après dissolution du matériel lithogénique, ou par remontée d'eaux profondes. Ces trois voies d'enrichissement sont *a priori* peu actives en zone HNLC, d'où l'idée de John Martin de tester l'hypothèse du fer grâce à des fertilisations artificielles.

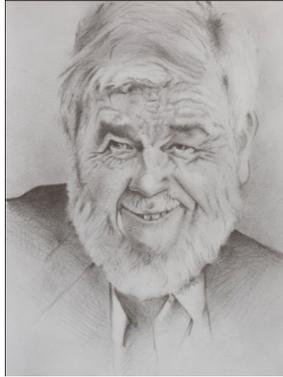


**Figure 8.18.** Dépôts de poussières lithogéniques ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ ) sur les océans, issues des déserts et transportées dans la haute atmosphère ; on notera le faible apport d'origine éolienne dans les zones HNLC (Jickells et al. 2005)

#### John Martin « Iron Man »

John Martin (1935, Old Lyme - 1993, Monterey) (voir figure 8.19) est l'un des scientifiques les plus doués de sa génération. Basé à Monterey (Californie), il s'est rendu célèbre par une plaisanterie faite en juillet 1988 lors d'un séminaire à Woods Hole. Se levant de son fauteuil roulant où le cloue une poliomyélite contractée à l'âge de dix-huit ans, il s'exclame d'une voix de stentor : « Donnez-moi un demi-pétrolier de fer et je vous donnerai une ère glaciaire », formule immédiatement reprise par la presse américaine à diffusion planétaire.

L'hypothèse selon laquelle l'océan Austral, l'océan Pacifique est équatorial et l'océan Pacifique nord, dites zones HNLC (*High Nutrient Low Chlorophyll*) riches en matières nutritives, mais relativement peu productives en phytoplancton, manquent de fer dissous, a été largement vérifiée depuis. Elle sert aussi de support aux géo-ingénieurs qui veulent fertiliser les océans en fer pour augmenter l'efficacité de la pompe biologique du dioxyde de carbone et le transfert de carbone vers l'océan profond où il est séquestré pour plusieurs centaines d'années.



**Figure 8.19.** John Martin, croquis de Philippe Pondaven

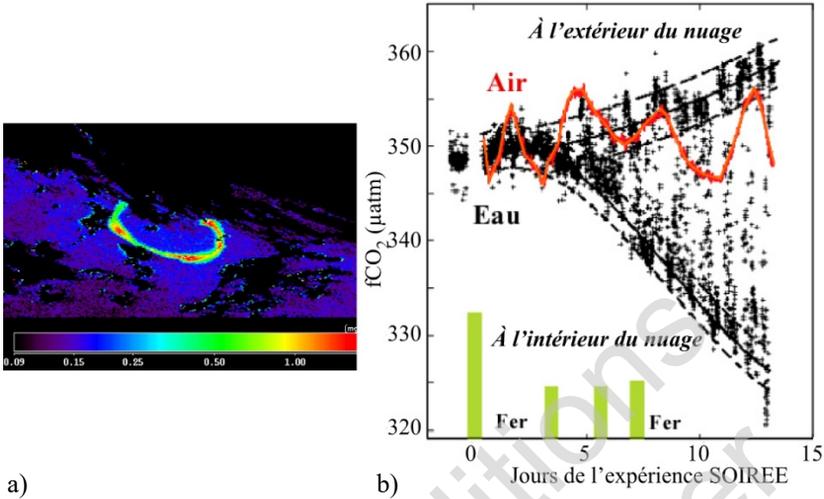
Mais lorsque le *Columbus Iselin* lève l'ancre le 11 octobre 1993 de Miami pour tester cette hypothèse dans les parages des Galápagos, John Martin, qui dirigeait le Moss Landing Marine Laboratories, est décédé depuis trois mois. Ses collègues Kenneth Coale, Kenneth Johnson et Richard Barber prouvent qu'en fertilisant l'océan en fer on déclenche bien une floraison phytoplanctonique.

**Encadré 8.3.** John Martin (1935-1993)

La campagne du *Columbus Iselin* en octobre 1993, conduite par Richard Barber, va tester l'hypothèse de John Martin dans les parages des Galápagos. Une vingtaine d'années auparavant, en campagne à bord du *Jean Charcot* dans la région de remontées d'eau profondes des côtes mauritaniennes, l'équipe française avait accueilli l'équipe américaine de l'*Atlantis II*.

Parmi ses hôtes, Richard Barber déclarait que, si nous observions au large des eaux riches en sels nutritifs et pauvres en chlorophylle, c'est parce qu'il manquait un élément-trace. Les océanographes évoquaient alors le mystérieux « effet Barber » sans qu'il soit alors clairement lié au manque de fer.

Après cette première mais infructueuse expérience de fertilisation, en octobre 1994, IronEx II est réalisée dans la même zone, à l'échelle de la centaine de kilomètres carrés, sous la conduite de Steve Fitzwater et Craig Hunter (Moss Landing Laboratories). Cette fois, c'est un succès. Après la fertilisation en fer, le phytoplancton croît de telle sorte que la concentration des eaux de surface en nitrates diminue et que le tiers du CO<sub>2</sub> atmosphérique est absorbé.



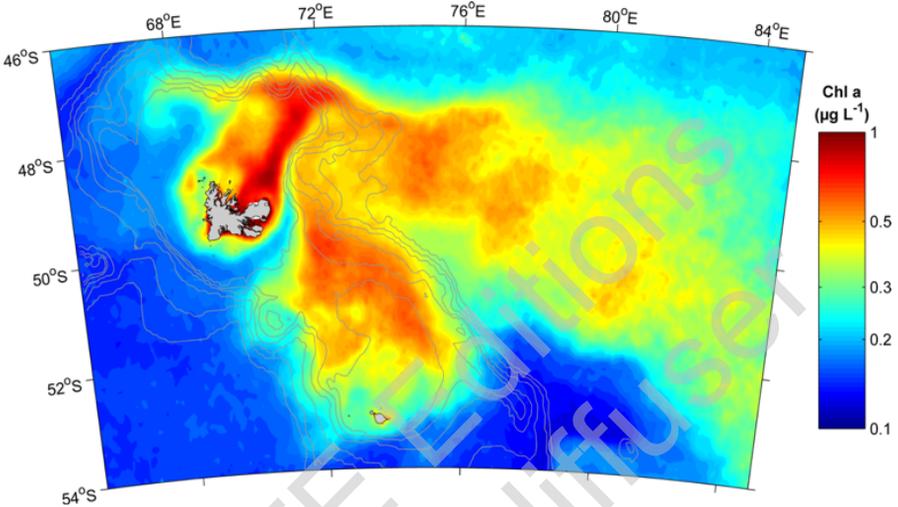
**Figure 8.20.** Fertilisation en fer de l'océan Austral (au sud de l'Australie) lors de l'expérience Soiree en mars 1999 (Bakker et al. 2005)

COMMENTAIRE SUR LA FIGURE 8.20.— a) La zone fertilisée en fer est riche en chlorophylle quarante-deux jours après la première injection de fer dissous, repérée grâce au capteur SeaWiFS; b) dans le « nuage » fertilisé en fer, la pression partielle de  $CO_2$  dans l'eau de mer diminue d'environ  $30 \mu atm$  en deux semaines.

De nombreuses expériences *in situ* vont suivre (Boyd et al. 2007 ; Baar et al. 2008) en zones HNLC et confirmer l'hypothèse de Martin : Soiree dans l'Antarctique en 1999 (voir figure 8.20), Seeds dans la partie arctique du Pacifique en 2001, Sofex dans l'Antarctique en 2002, Series dans l'écosystème subarctique en 2002, Eifex sur un tourbillon moyenne échelle dans l'Atlantique sud en 2004, Lohafex dans l'Indien sud en 2009. Cette dernière campagne, conduite à bord du brise-glace allemand *Polarstern*, soulève une polémique. Elle est menée dans des eaux pauvres en sels nutritifs, y compris en acide silicique. La fertilisation d'une zone de 900 kilomètres carrés par du sulfate de fer entraîne une floraison dont les diatomées sont absentes en raison de la carence en acide silicique. Mais, alertés par des mouvements écologistes, les médias multiplient les titres où fleurissent les termes « incertitudes », « controverses », « polémiques ». Suspendue le 14 janvier par le ministère allemand de l'Environnement, la campagne, dirigée par Victor Smetacek (Allemagne) et Syed W.A. Navqi du National Institute of Oceanography (Inde), reprend immédiatement après les avis favorables d'éminents scientifiques au niveau international, et de quatre entités scientifiques (British Antarctic Survey,

Institut Geomar, Institut Max Planck de droit international public et droit des peuples et Institut de droit de l'université de Kiel).

#### 8.4.4. Fertilisations naturelles



**Figure 8.21.** Floraisons de grande ampleur (moyenne annuelle de la teneur en chlorophylle) dans les structures à méso- et sous-mésoéchelle générées dans le sillage du courant circumpolaire à l'est de Kerguelen (couleurs rouges) alors que le système environnant demeure pauvre (HNLC, couleurs bleues). Copernicus Marine Service mélangeant les données de plusieurs capteurs couleur de l'océan : SeaWiFS, Modis-Aqua, Meris, VIIRS et Olci-S3A.

En dehors de ces expériences, une fertilisation naturelle des systèmes marins peut également intervenir dans le sillage des péninsules ou des îles (par lessivage des roches et sédiments) et/ou à partir des plateaux continentaux qui accumulent des sédiments dont les eaux interstitielles ont été enrichies en fer dissous par recyclage. Ce recyclage est particulièrement actif lorsque ces plateaux comportent des bassins où le temps de résidence des masses d'eau et de la matière organique exportée depuis la couche de surface est grand. C'est le cas au niveau des îles australes (Crozet et surtout Kerguelen) dans le courant circumpolaire antarctique.

Le processus de réapprovisionnement de l'eau de surface en fer dissous est ici d'autant plus efficace que des mouvements ascendants sont générés par des structures physiques à méso- et sous-mésoéchelle (voir chapitre 7), particulièrement

actives dans le sillage des îles Kerguelen (voir figure 8.21). Pour Stéphane Blain, la richesse en phytoplancton observée par les capteurs satellitaires dans cette région, contrastant avec la pauvreté relative des eaux environnantes, s'explique par une fertilisation naturelle en fer.

Les campagnes successives du programme Keops à bord du *Marion Dufresne* entre 1977 et 2011 vérifient cette hypothèse (Blain *et al.* 2007 ; Blain *et al.* 2008 ; Blain *et al.* 2015). Le programme Crozex, mené par l'Anglais Raymond Pollard dans le sillage des îles Crozet à bord du RRS *Discovery*, le vérifie également (Pollard *et al.* 2007).

#### 8.4.5. Géo-ingénierie

Les expériences en milieu naturel montrent que l'enrichissement artificiel en fer des eaux de surface est effectivement suivi par une baisse notable de la pression atmosphérique en CO<sub>2</sub> au-dessus de la zone enrichie, ce qui vérifie l'hypothèse de John Martin du moins partiellement. Mais trois critiques sont adressées à ces expériences :

1) elles ne donnent pas systématiquement lieu à une exportation accrue de carbone organique vers l'océan profond. Autrement dit, l'exportation de carbone n'est pas renforcée (voir notamment (Charette et Buesseler 2000)) lorsque les impacts de la fertilisation sur différents organismes du réseau trophique favorisent le recyclage de carbone dans la couche euphotique aux dépens de l'exportation de carbone vers l'océan profond ;

2) le rendement de l'opération en termes de rapport carbone exporté/fer dissous ajouté dans les expériences de fertilisation artificielle est environ cent fois inférieur à ce qui se passe dans le cas des fertilisations naturelles (Blain *et al.* 2007). Autrement dit, pour paraphraser John Martin, ce n'est pas un demi-tanker de fer qu'il faudrait déverser dans l'océan Austral pour le fertiliser mais bien plus, et ceci, tous les ans ;

3) enfin, l'efficacité des fertilisations artificielles quant au pompage atmosphérique de CO<sub>2</sub> sur le long terme est contestée (Aumont et Bopp 2006).

Finalement, certains scientifiques souhaitent maintenir ouverte l'option de la manipulation de l'océan pour l'atténuation de l'effet de serre (par exemple (Güßow *et al.* 2010)). Mais la plupart des scientifiques, s'ils sont d'accord pour réaliser des expériences de fertilisation de l'océan à petite échelle, sont opposés à sa manipulation à grande échelle car les impacts prévisibles sur la chaîne trophique sont trop importants et incontrôlables. En fait, la question a débordé le domaine des scientifiques pour devenir une question éthique et sociétale.

En 2007, la Commission pour la diversité biologique estime « ne pas être en mesure d'évaluer les risques et les bénéfices de la fertilisation de l'océan ». Cette Commission se déclare, un an plus tard, en faveur d'un moratoire sur la fertilisation des océans, excluant les expériences scientifiques à petite échelle en milieu côtier ; ce moratoire a été réaffirmé en 2010.

D'un point de vue éthique, il est avancé que la fertilisation des océans n'est pas admissible pour deux principales raisons :

1) manipuler l'océan ne résoudrait en rien le problème posé par la perturbation anthropique multifactorielle du climat, et conforterait les partisans du scénario « ne changeons rien » contre l'avis du GIEC ;

2) un consensus des parties concernées, au sein de la CDB et au-delà, paraît impossible à trouver en faveur d'une option de géo-ingénierie (Hale et Dilling 2011).

## 8.5. Conclusion

En expliquant ces trois défis nous avons montré que, depuis la naissance de l'océanographie, le spectaculaire développement des sciences et des techniques ont permis tout à la fois de mieux connaître les ressources biologiques et minières de l'océan et d'identifier les risques réels ou potentiels qu'il encourt en raison d'une surexploitation guidée par des intérêts à court terme aux dépens du maintien des ressources sur le long terme.

Les progrès dans la compréhension des échanges océan-atmosphère et du cycle du CO<sub>2</sub> nous font réaliser que l'océan est le « maître du climat ». La tentation est grande de manipuler la pompe biologique de carbone pour accentuer la capture de CO<sub>2</sub> par l'océan. Les conséquences d'une telle manipulation seraient incontrôlables. Dans le contexte d'une forte expansion démographique planétaire, il faut décidément réduire et à court terme les rejets de gaz à effet de serre de la civilisation industrielle, si l'on veut continuer à bénéficier du rôle régulateur de l'océan.

Mais l'océan est confronté à bien d'autres défis : impacts du changement climatique sur les zones côtières (augmentation du niveau de la mer, impacts des événements météorologiques extrêmes), accroissement des rejets anthropiques induisant l'expansion des zones mortes, dissémination à grande échelle des matières plastiques avec, à la fois une accumulation dans les tourbillons des courants généraux (le septième continent) et un fractionnement sous forme de microplastiques ingérés par tous les composants des réseaux trophiques, etc.

Science et société, science et éthique. La communauté scientifique est de plus en plus confrontée à des choix éthiques et sociétaux. Désormais, les scientifiques s'impliquent non seulement dans la compréhension des processus mais dans la recherche de solutions sociétales. C'est tout l'enjeu du programme international Future Earth lancé en 2012<sup>2</sup> et qui vise à renforcer les connaissances sur les aspects environnementaux et humains du changement planétaire et à trouver des solutions pour le développement durable.

© ISTE Editions  
Ne pas diffuser

---

2. [www.futureearth.org](http://www.futureearth.org).