Chimie et nature (acte II)[1]

La classification périodique des éléments « travaillée » par le vivant

par **Robert PINCE**
Maître de conférence
ENSIACET - 31077 Toulouse Cedex 4
Robert.Pince@ensiacet.fr
et **Robert WOLF**
Directeur de recherche au CNRS
Université Paul Sabatier - 31062 Toulouse Cedex 4

RÉSUMÉ

Une brève récapitulation des éléments les plus présents dans l'Univers d'une part et dans « le vivant » d'autre part montre que le vivant opère une étonnante sélection qui rapproche l'ensemble des espèces et les distingue fondamentalement du milieu dans lequel elles évoluent. Si la découverte et l'utilisation de la classification périodique correspond, pour le XIX^e^ siècle au premier acte d'une aventure scientifique originale (rappelée dans l'article précédent[2], le second acte, correspondant à la deuxième partie du XX^e^ siècle, commence une nouvelle aventure : « expliquer comment la géologie des éléments, sous l'influence du vivant, circule dans l'intervalle de température qui lui est imposé ». C'est le thème de ce deuxième article. Il décrit successivement les innovations qui ont permis d'approfondir notre connaissance de l'histoire de la Terre, l'apparition du vivant et les changements d'échelle de temps qu'elle implique, les différentes hypothèses sur les interactions entre le vivant et l'environnement, la compréhension du phénomène de production d'oxygène par les plantes et son rôle dans la respiration qui conduit, quelques siècles plus tard aux diverses expériences « Biosphère ». On aborde également le rôle de l'eau, la chimie de l'atmosphère, les relations avec le climat, avant de développer le rôle de quelques éléments particulier sur le vivant…

INTRODUCTION

Dans le cadre des olympiades nationales de la chimie, le thème de l'an passé (*NDLR* 1998) « Chimie et nature » a bénéficié d'une prolongation pour 1999. Nous n'avons eu que l'embarras du choix pour trouver un thème tant le domaine est étendu. Nous avons choisi une approche nouvelle étudiant les modifications effectuées par le vivant sur la chimie et la géologie de l'écorce terrestre.

(1) ***NDLR :*** Cet article a été publié dans la revue de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Toulouse (devenue actuellement l'ENSIACET).

(2) Voir BUP n° 843, avril 2002, p. 657-675.

Dans l'article précédent, nous avons évoqué l'émergence de la classification périodique des éléments au XX^{e} siècle, jusqu'à la découverte des 90 qui sont stables et constituent la trame intime de tout ce que nous observons (*cf.* aussi Chimie et nature, *Fréquence chimie*, n° 18, janvier 1998). Un point d'histoire mérite d'être souligné : alors que notre communauté humaine tâtonne et progresse depuis des dizaines de milliers d'années pour connaître son environnement, c'est pratiquement en deux siècles seulement que les connaissances concernant ces éléments chimiques se sont établies. La figure 1 illustre bien le caractère « explosif » de cette avancée majeure, valable pour notre planète mais aussi pour l'ensemble de l'Univers.

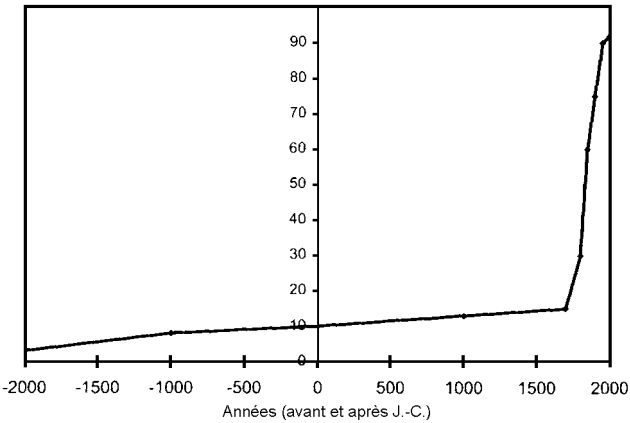

Figure 1 : Nombre d'éléments chimiques connus.

Plusieurs aspects méritent d'être rappelés. D'abord, aussi variés que soient les objets de notre environnement, la plus performante des analyses chimiques conduit toujours au pourcentage des seuls éléments répertoriés dans le tableau périodique. Deuxièmement, cette classification, pour ainsi dire l'alphabet du monde matériel, est valable pour ***tout*** l'Univers, et ne comporte qu'une seule limite. Quand augmente la température, disons jusqu'à 5000 K, les structures moléculaires, puis les atomes sont dissociés en sous-structures élémentaires : radicaux, cations multi-ionisés, électrons, protons, neutrons... on entre alors dans le domaine des physiciens.

Malgré tout, le chimiste doit rester modeste :

- Quoique tous les éléments soient présents dans l'ensemble de l'Univers deux d'entre eux, l'hydrogène et l'hélium, constituent à eux seuls 99 % de la chimie universelle. Les quatre-vingt-dix autres occupent une proportion dérisoire ; pourtant, c'est pratiquement d'eux seuls que nous allons parler...
- Si nous quittons l'Univers pour nous focaliser sur notre planète, huit éléments à eux seuls forment 99 % de la Terre. Ce sont, par ordre d'importance : fer (Fe), oxygène (O), silicium (Si), magnésium (Mg), soufre (S), nickel (Ni), calcium (Ca) et aluminium (Al).

L'écorce terrestre conduit à une suite qui n'est pas très différente : O, Si, Al, Fe, Ca, sodium (Na), potassium (K), Mg.

- En contraste, dans le *vivant* (le corps humain étant pris comme exemple), la séquence qui mène à 99,5 % est ***très différente*** : oxygène (O), carbone (C), hydrogène (H), azote (N) (les quatre forment déjà plus de 98 % du corps), calcium (Ca), phosphore (P), potassium (K), soufre (S), ce qui ne veut pas dire que les absents - fer (Fe), manganèse (Mn), cobalt (Co), cuivre (Cu), zinc (Zn) - ... aient un rôle négligeable.

Les abondances relatives des éléments présents dans l'écorce terrestre et dans le vivant sont donc fort différentes. Le vivant opère donc une étonnante sélection *qui rapproche l'ensemble des espèces et les distingue fondamentalement du milieu dans lequel elles évoluent*.

Si la découverte et l'utilisation de la classification périodique correspond, pour le XIX^{e} siècle au premier acte d'une aventure scientifique originale, le second acte, correspondant à la deuxième partie du XX^{e} siècle, commence une nouvelle aventure : « expliquer comment la géologie des éléments, sous l'influence du vivant, circule dans l'intervalle de température qui lui est imposé ». C'est le thème de ce *Chimie et nature (acte II)* qui récapitule les avancées remarquables qui ont été effectuées sur ce sujet au cours du siècle qui vient de se terminer. Le lecteur devra cependant garder à l'esprit le fait que, l'espace de temps couvert étant grand (des centaines de milliers à des centaines de millions d'années), les chiffres avancés ne peuvent actuellement être très précis.

POUR EN SAVOIR PLUS SUR L'HISTOIRE DE NOTRE PLANÈTE...

Trois innovations majeures (profils sismiques, forages profonds et nouvelles méthodes de datation) ont contribué, à partir du milieu des années 60, à changer du tout au tout nos connaissances sur l'histoire de la Terre.

Profils sismiques du fond océanique

Des canons à air comprimé sont remorqués dans le sillage d'un navire spécialement équipé. Plus loin, un tube de plastique d'environ 800 m de long, maintenu à une profondeur constante de 10 m, complète l'attelage. À l'intérieur du tube, des centaines d'hydrophones, des micros sous-marins, sont placés à intervalles réguliers.

Les décharges des canons à air, tels de petits séismes, produisent des ondes sonores qui pénètrent la croûte océanique et sont réfléchies par ses discontinuités. Incompréhensibles tels quels, les signaux réfléchis sont captés par les hydrophones, puis envoyés à l'ordinateur de bord. Celui-ci les traite, calcule pour chacun d'eux l'endroit de la croûte qui a joué le rôle de réflecteur, puis les restitue sous forme graphique. À chaque passage du navire correspond ainsi, sans aucun forage, un profil géologique. Cette coupe à travers le fond qui montre la position des grandes strates sédimentaires peut avoir plusieurs centaines de kilomètres de longueur. Un nombre suffisant de ces profils permet de des-

siner une vue en trois dimensions de la structure du fond. Volcans, dômes de sel, failles, zones de subduction... tout cela s'inscrit sur la sortie imprimante, la résolution étant d'une trentaine de mètres (cf. figure 2a et 2b).

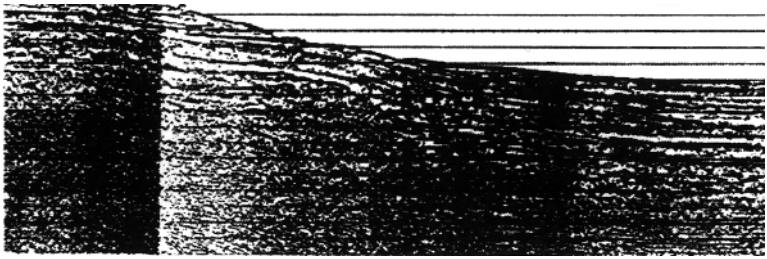

Figure 2a : Profil de réflexion sismique de la bordure occidentale de l'océan Atlantique, au large du cap Hatteras, en Caroline du Nord (D.R.).

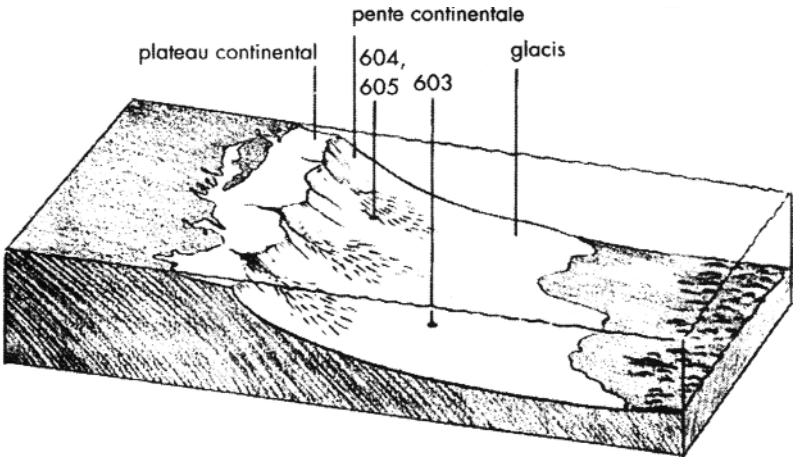

Figure 2b : Vue en perspective de la même région, montrant le plancher océanique, la pente continentale et le glacis. Quand les sédiments d'origine continentale sont arrivés dans l'océan, ils se sont empilés sur le plateau, puis ont basculé par dessus bord. Dévalant la pente continentale, ils se sont dispersés sur le fond sur des centaines de kilomètres. Ces accumulations de détritus au pied des pentes continentales formes des glacis en pente douce. Le glacis est une clé importante de l'histoire de la Terre, car ses empilements de sédiments constituent un enregistrement fiable et sensible des événements qui se sont produits plus haut, sur le plateau et le continent. Les nombres 603, 604 et 605 désignent des forages effectués dans la zone considérée (D.R.).

Forages profonds

En mai 1983, une équipe internationale d'une vingtaine de chercheurs prit place à bord du *Glomar Challenger*, le navire du Deep sea drilling project (DSDP), pour forer le glacis continental, à 270 km à l'est du cap Hatteras, en Caroline du Nord. Cette expédition, appelée « phase 93 » permit, grâce à un forage à grande profondeur, d'extraire une

carotte complète de sédiments allant du Pléistocène inférieur (environ 2,5 millions d'années) au Crétacé inférieur (environ 130 millions d'années). Elle est particulièrement intéressante, car elle informe sur la transition entre les domaines continental et océanique. L'énorme accumulation de sédiments témoigne à la fois des événements qui se sont produits en mer et sur terre.

Ces forages profonds sont inégalables, puisqu'ils fournissent un enregistrement presque continu de l'histoire géologique. D'autre part, les fossiles trouvés permettent de déterminer l'âge des discontinuités entre les couches successives d'empilement des sédiments.

De la même manière, mais relevant d'un temps beaucoup plus court (150 000 ans environ), les forages dans les glaces apportent aussi de précieuses informations. Ceux qui ont été réalisés au Groenland nous racontent d'anciennes pollutions atmosphériques par les métaux lourds Cu, Pb, Cd au temps des Grecs, des Romains ou des Chinois (vers l'an 1000). On imagine les précautions à prendre pour doser un gramme de cadmium dans vingt millions de tonnes de glace.

Techniques de datation et échelles de temps

Une infinie variété d'organismes microscopiques, le plancton, dérive au gré des courants océaniques où il se multiplie, se nourrit et meurt. Le mot plancton vient du grec *plagkton*, « qui erre ». Cette vie superficielle errante génère une pluie permanente de débris qui forment sur le fond de l'océan une couche de sédiments. L'épaisseur de cette couche (plusieurs centaines de mètres) augmente d'environ 2 cm par millénaire. Ces sédiments constituent de précieux enregistrements de l'histoire géologique, reflétant l'évolution climatique, hydrodynamique, chimique et biologique des océans.

Chaque zone étant caractérisée par des fossiles spécifiques, les chercheurs sont capables, en mesurant l'abondance des isotopes radioactifs, de dater ces fossiles et d'attribuer ainsi aux différentes zones des dates absolues, d'une précision de l'ordre du million d'années.

Les squelettes fossiles donnent aussi des informations sur les environnements anciens, puisque leur composition chimique reflète les conditions physiques de l'eau de mer où vivaient les créatures dont ils proviennent. Des instruments sophistiqués permettent de mesurer les rapports des différents isotopes de l'oxygène et du carbone dans une coquille. Ces rapports étant liés à la température de l'eau au moment de la formation de la coquille, il est possible d'en déduire l'évolution du climat dans le passé géologique.

L'extraordinaire moisson fournie par ces méthodes a renouvelé notre vision de l'histoire longue de la croûte terrestre.

Les spécialistes ont actuellement assez de données pour affirmer que le vivant y est présent *depuis 3600 millions d'années*. Ils ajoutent que celui-ci a subi plusieurs et importants reculs, mais sans jamais cesser d'exister. Cinq crises majeures d'extinction en masse d'espèces se sont produites à l'Ordovicien (440 millions d'année), au Dévonien (365 mil-

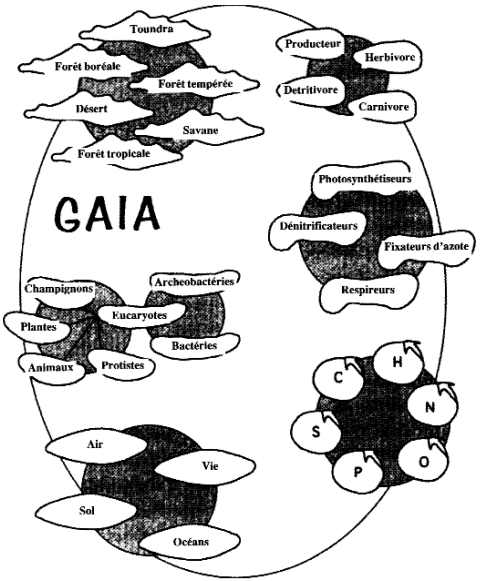

Figure 3 : Les biomes (taïga, savanes tropicales, forêts tempérées), les associations trophiques et biochimiques, les matières premières, les domaines génétiques, les équipes eucariotiques, autant d'acteurs et d'association qui forment GAIA. Ce sont les deux ensembles situés au bas de la figure qui symbolisent le mieux la suite de cet article (D.R.).

lions d'années), au Perinien (245 millions d'années), au Trias (210 millions d'années) et enfin au Crétacé (66 millions d'années). Chaque crise dure de 0,1 à 6 millions d'années et affecte un nombre impressionnant d'espèces. Il faudra ensuite plusieurs millions d'années pour que la biodiversité se reconstitue. Les paléobiologistes estiment que ces extinctions massives sont dues à des changements climatiques dont les causes sont discutées : dérive des continents, éruptions volcaniques, chutes de météorites, irrégularités de l'émission solaire. Ces crises n'ont cependant, jusqu'ici, jamais affecté la continuité de la vie ; une telle continuité nous intrigue, et il est bien dans notre nature de nous efforcer d'expliquer cette énigme.

Par la suite, nous passerons plusieurs fois d'une échelle de temps à une autre, toutes très longues à l'échelle humaine, mais qui doivent impérativement être distinguées : 10 000 ans et 440 millions d'années ne peuvent être confondus. Pour faciliter la compréhension du lecteur, de nombreux ouvrages proposent une transformation bien utile : ramener à un seul mois de trente jours l'ensemble de l'histoire de la Terre. Autrement dit, les 4,5 milliards d'années de notre Terre sont transformés en trente « jours » de 150 millions d'années chacun. Ce changement d'échelle permet de mieux situer les événements qui jalonnent l'évolution. Ainsi, nous ne savons rien sur la première semaine du mois, sinon que les plus anciens fossiles procaryotes apparaissent le 7. Les plus anciens eucaryotes arrivent le 21, les premiers fossiles pluricellulaires le 26. C'est seulement le 27 que la vie abonde, essentiellement sous forme d'invertébrés. Les trois derniers jours du mois, la vie connaît une phase de croissance véritablement explosive : premiers végétaux terrestres, premiers vertébrés et animaux terrestres, premiers amphibiens. Avec l'apparition des immenses forêts du carbonifère et des insectes, nous sommes déjà le 29 à midi. Dans l'après-midi du 29, apparaissent les premiers mammifères, tandis que les reptiles dominent l'ensemble de la planète. Enfin, le **dernier jour** voit arriver les dinosaures, les premiers oiseaux et les plantes à fleurs. Tout à fait à la fin du mois, à minuit moins dix, arrive *l'homo sapiens*, dont l'histoire connue occupe **les trente dernières secondes du trentième et dernier jour** : quelle place modeste nous laisse ce scénario accéléré !

DE VERNADSKY À GAIA...

Un regard nouveau sur notre environnement a été esquissé il y a longtemps, dans un livre publié en russe (1926) et en français (1929) par Vladimir VERNADSKY *La biosphère* [1]. Comme souvent, ce regard qui devançait son temps constituait une telle nouveauté pour la biologie et la géologie que le livre n'eut pratiquement aucune influence. Réparation de cette injustice vient d'être faite puisque, superbement présentée et commentée, une traduction anglaise de *La biosphère* est parue en 1998. Elle comporte une préface que signent une douzaine de scientifiques de renom (dont Lynn MARGULIS) et surtout elle est enrichie par plus de 400 commentaires et notes de lecture, ainsi que 350 références. C'est un livre essentiel concernant le thème que nous présentons.

C'est dans cet ouvrage que VERNADSKY écrit : *« Le mouvement ininterrompu qui résulte de la multiplication des êtres vivants est exécuté de manière inexorable avec une régularité mathématique étonnante. C'est le trait le plus essentiel et le plus caractéristique de la biosphère. Ce mouvement a lieu à la surface de la Terre, pénètre l'ensemble de l'hydrosphère et peut être observé à chaque niveau de la troposphère (du sol à 13 km environ). Il a même lieu à l'intérieur du vivant, sous forme de parasites. Sur des myriades d'années, l'ensemble du vivant a accompli un* ***travail géologique colossal*** *permettant à l'énergie solaire reçue sur notre planète de pénétrer partout ».*

De manière indépendante, et sans avoir lu VERNADSKY, J.E. LOVELOCK réinvente en 1979 une approche semblable, pour appréhender la profonde marque du vivant sur son environnement. C'est l'hypothèse séduisante et parfois critiquée de GAIA, développée dans le livre *La Terre est un être vivant, l'hypothèse de GAIA* [2]. GAIA, dans la mythologie grecque, est la Terre divinisée, fille d'Eros et de la nuit. Avec Ouranos, elle a donné naissance aux Titans et aux Cyclopes.

LOVELOCK a certainement joué un rôle crucial dans la reprise d'une vision globale de la planète où *les êtres vivants interviennent activement et contrôlent des paramètres physico-chimiques comme la température moyenne de la surface ou la teneur en sel des océans*.

Si l'on ne sait toujours pas quand et comment les premières formes de vie sont apparues, l'idée d'une évolution et d'une interaction forte entre l'atmosphère, l'hydrosphère (les océans) et la lithosphère (les continents) a permis de discerner avec de plus en plus de précision les paramètres et les environnements où a pu se développer une biosphère organisée. Une fois installée, la vie s'est révélée un puissant agent de transformation géochimique, capable de modifier l'ensemble de la surface de la Terre et son atmosphère, faisant disparaître progressivement les conditions initiales de son apparition.

Imaginons un monde où il n'y aurait pas de bactéries dénitrifiantes, mais uniquement des bactéries incorporant l'azote, N_2^- Celui-ci serait prélevé en permanence dans l'atmosphère, et cet azote fixé dans les écosystèmes terrestres, très soluble dans l'eau, se dirigerait irrémédiablement vers l'océan. La solubilité des nitrates dans l'eau est tellement importante que rien n'empêcherait l'épuisement de l'azote de l'atmosphère en trente millions d'années.

Hors, le système est resté dynamiquement fonctionnel sur une durée disons cent fois plus importante.

Dans l'optique de LOVELOCK, GAIA est donc nécessairement le résultat d'une suite d'événements au cours desquels le système n'a pas cessé de fonctionner, *comme s'il savait réagir à quelque épuisement, accumulation de toxiques, etc*. Sur le long terme, aucune accumulation de produit toxique inhibant le fonctionnement du vivant ne s'est faite : ainsi, quand on est passé de H_2S à H_2O comme système réducteur, ce qui a laissé comme déchet d'abord du soufre, ensuite de l'oxygène, le vivant a été capable sur le long terme de réagir et de s'adapter. Cette capacité du vivant à réagir pour perdurer est une captivante énigme, comment l'appréhender ?

DU PASTEUR JOSEPH PRIESTLEY AU PROJET BIOSPHÈRE II

À la fin du XVIII^e siècle, un des événements clés permettant d'aborder les problèmes du vivant est la compréhension de la production du dioxygène par les plantes et son rôle dans la respiration, illustré dans le scénario du pasteur Joseph PRIESTLEY (*cf.* figure 4a).

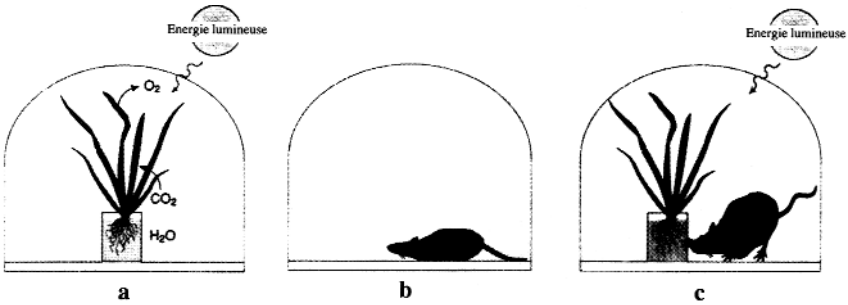

Figure 4a : La production de dioxygène par les plantes a été découverte au XVIII^e siècle par Joseph PRIESTLEY : une plante placée sous une cloche contenant du CO_2 continue à pousser en présence de la lumière du Soleil (a) tandis qu'une souris placée dans les mêmes conditions ne tarde pas à mourir (b). En (c), plante et souris survivent quelque temps quand toutes deux sont placées ensemble, sous la cloche, au Soleil (D.R.).

La beauté de l'expérience réside dans la survie pendant quelque temps (plusieurs heures, sans doute) de la souris. Cependant, quelques feuilles ne peuvent produire assez d'oxygène longtemps. D'autre part, la souris ne peut s'en nourrir sans faire disparaître sa source d'oxygène, et les déchets de la souris ne peuvent être recyclés.

Les connaissances accumulées pendant deux siècles ont permis de concevoir, dans une cloche de même type totalement close, un système qui réalise une boucle avec une cascade d'espèces vivantes, permettant aux habitants de l'aquarium de fonctionner en utilisant l'énergie solaire comme seule source d'énergie.

La compagnie « Ecosphere Associates » de Tucson (Arizona) a donc conçu des

sphères de 20 à 50 cm de diamètre, hermétiquement scellées et sans aucune communication avec l'extérieur (*cf.* figure 4b).

La cascade d'êtres vivants : algues (producteurs de O_2), crevettes (respiration et production de CO_2), bactéries détritivores qui recyclent les déchets, permet au vivant de fonctionner en ***boucle***, et en principe, de vivre en autarcie totale pendant plusieurs années. La lumière solaire est l'unique source d'énergie de ce monde fermé (*cf.* figure 4c).

Figure 4b : La boule fabriquée par Ecosphère Associates à Tucson (Arizona). Cette sphère complètement close, remplie d'eau aux 3/4 contient une dizaine de crevettes, un peu de gravier et des algues. Les organismes vivent dans la sphère sans communication avec l'extérieur, ils ne sont pas nourris et l'eau n'est pas changée. Une seule source d'énergie permet à l'ensemble de fonctionner plusieurs années en y maintenant la vie : l'énergie du Soleil (D.R.).

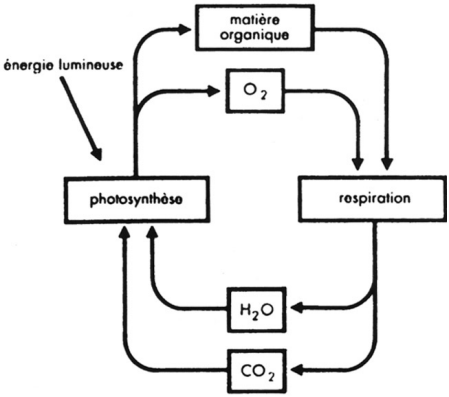

Figure 4c : Le cycle de la vie : le recyclage du carbone, de la matière organique provenant de la photosynthèse (les algues) au gaz carbonique des crevettes qui mangent et respirent, aidé par les détritivores, une suite de microorganismes convenablement choisis (D.R.).

Le programme de recherche « Systèmes Écologiques Contrôlés » de la NASA a permis la mise au point de systèmes auto-régénérants, où des équipages tentent d'y vivre aussi longtemps que possible.

C'est ainsi que la société « Space Biosphères Ventures » a construit un gigantesque terrarium comportant un océan, une jungle, un désert, une savane et des marais salants miniatures. Ce système a été baptisé Biosphère II, par opposition à Biosphère I qui est celle, bien plus vaste, dans laquelle nous vivons. Ces réalisations sont considérées comme d'excellents modèles destinés à simuler le comportement de notre propre biosphère et a stimuler les recherches sur le sujet.

De tels systèmes suggèrent que le **bilan** de la vie sur Terre est un circuit entre la photosynthèse et la respiration, ou, pour être davantage biologiste, un combat sans fin ou

une symbiose entre chloroplastes et mitochondries. En effet, ces deux types d'organites cellulaires travaillent en sens inverse : les chloroplastes synthétisent des molécules hydrocarbonées, tandis que les mitochondries les dégradent.

Protons et électrons produits par les chloroplastes permettent la synthèse de molécules hydrocarbonées en agissant sur une molécule de CO_2 pour fournir $(CHOH)_n$ symbolisant les sucres. Alors que les mitochondries vont dégrader ces derniers. Du point de vue de l'oxydoréduction, ces organites travaillent aussi en sens inverse. Les premiers, au cours de la photosynthèse décomposent l'eau et produisent de l'oxygène alors que les secondes, lors de la respiration, réalisent un processus opposé produisant de l'énergie.

DE L'EAU...

L'océan peut être considéré comme la matrice originelle et le réservoir essentiel du vivant. C'est l'impression qui s'impose quand nous essayons de déterminer où se trouvent, dans notre environnement, les molécules d'eau. Si nous prenons une quantité globale arbitraire d'un million de molécules d'eau, les océans en contiennent 972 000, les glaciers des pôles 21 000, les eaux continentales profondes (jusqu'à 3200 m) 6 800. Il n'en reste alors plus que 130 pour les lacs, 60 pour l'humidité des sols, 1 pour l'atmosphère (vapeur, nuages, gouttelettes), 1 pour toutes les rivières du monde, *et enfin 0,5 pour le vivant*.

L'eau contenue dans l'ensemble du vivant représente donc simplement 0,5/1 000 000 de l'ensemble de l'eau présente sur Terre !

Et pourtant, un calcul tout simple va nous montrer que le vivant peut être d'une importance plus grande que ne semblent représenter les 0,5 millionièmes précédents. Si nous nous demandons quelle masse peut produire une simple cellule d'E. coli en quarante-huit heures, en supposant que chaque vingt minutes a lieu une division cellulaire, nous obtenons une réponse étonnante : pendant ces quarante-huit heures, 144 divisions cellulaires vont avoir lieu, et $N = 1 \times 2^{144}$ cellules vont en résulter, soit 10^{43} cellules. Puisque une simple cellule d'E. coli a pour masse 10^{-12} grammes, 10^{43} cellules représentent 10^{23} tonnes (la masse de la Terre est pour mémoire de 6×10^{21} tonnes). Ainsi, une bactérie produirait ***en deux jours seulement*** près de mille fois la masse de la Terre ! En fait, dès que quelques millions de bactéries prospèrent, des amibes commencent à les manger... et ainsi de suite.

CHIMIE DE L'ATMOSPHÈRE SUR LE TEMPS LONG

Les atmosphères de Mars et de Vénus avec la présence dans chacune de plus de 90 % de CO_2 résultent d'événements expliqués de manière simple et cohérente par les astronomes. En ce sens, l'atmosphère de la Terre est atypique : la quantité de gaz carbonique atmosphérique de notre atmosphère actuelle (0,035 %) est 100 000 fois plus petite que l'équivalent en CO_2 contenu dans les roches carbonatées. Autre anomalie, l'atmo-

sphère de la Terre contient 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, très peu de méthane (0,00017 %), et beaucoup d'autres molécules à l'état de traces : NO_2, NH_3, H_2, CO... Curieusement, le CO_2 piégé dans les carbonates de l'écorce terrestre est, en ordre de grandeur, d'une masse comparable à celle que l'on estime exister dans l'atmosphère primordiale de notre planète : plus de 95 % de CO_2 comme sur Mars et Vénus. Le vivant a donc piégé le CO_2 atmosphérique primitif pour le transformer en sédiments, beaucoup étant formés de coquillages carbonatés.

Nous reviendrons ultérieurement sur ce thème.

L'OXYGÈNE : DE PRESQUE RIEN À 20 %

Par quel mécanisme notre atmosphère peut-elle contenir depuis plusieurs centaines de millions d'années plus de 20 % d'oxygène, tandis que celle de nos voisines les plus proches (Mars et Vénus) en ont moins de 0,1 % ? Et aussi, comment quelques molécules oxydables, comme CH_4, NH_3, H_2, CO peuvent-elles subsister dans un tel mélange ?

Comme pour le gaz carbonique, la réponse est simple : grâce à la présence du vivant en activité *depuis plus de 3,6 milliards d'années !*

L'oxygène, élément inattendu à une telle concentration, résulte de l'activité biologique, essentiellement de la photosynthèse.

L'activité photosynthétique est le plus grand producteur d'oxygène depuis 600 millions d'années. Les uns s'accordent à penser que le phytoplancton est le facteur dominant, dans cette production, les autres penchant pour la photosynthèse des plantes terrestres.

C'est au précambrien, il y a 2,7 milliards d'années, que l'apparition de la chlorophylle, et donc de l'activité photosynthétique, a permis à l'atmosphère de commencer à s'enrichir en oxygène libre. Il y a 2 milliards d'années l'atmosphère pouvait contenir 1 % de la quantité actuelle d'oxygène.

La quantité d'oxygène a ensuite continué à progresser, jusqu'à dépasser puis se stabiliser à son niveau actuel (20,9 %). L'énergie nécessaire pour maintenir un tel déséquilibre en oxygène est fournie par le Soleil. Sans vie, la photochimie inorganique ne maintiendrait qu'un milliardième de cette valeur. Cette atmosphère oxydante maintient à de très faibles concentrations de nombreuses molécules combustibles. L'arrêt de la concentration en oxygène à une valeur proche de 20 % mérite commentaire. La figure 5 (page ci-après) montre, à partir de données expérimentales, la probabilité d'incendies de forêts ou d'herbes en fonction d'atmosphères contenant des concentrations d'oxygène différentes. Les incendies naturels sont déclenchés par des éclairs ou des combustions spontanées ou accidentelles. Leur probabilité dépend beaucoup du contenu en humidité des combustibles - chaque ligne correspond à un niveau d'humidité différent allant du totalement sec (0 %) jusqu'au visiblement humide (45 %). Dans le cas du contenu en oxygène actuel (21 %) les incendies ne se déclenchent pas lorsque le degré d'humidité est

supérieur à 15 %. Par contre à 25 % d'oxygène, les rameaux détrempés et l'herbe des forêts prennent feu. Le niveau d'oxygène actuel se situe à un point où les risques et les avantages s'équilibrent au mieux. Il se déclenche des incendies, c'est certain mais leur fréquence est supportable au regard de la productivité que permet un seuil d'oxygène de 21 %.

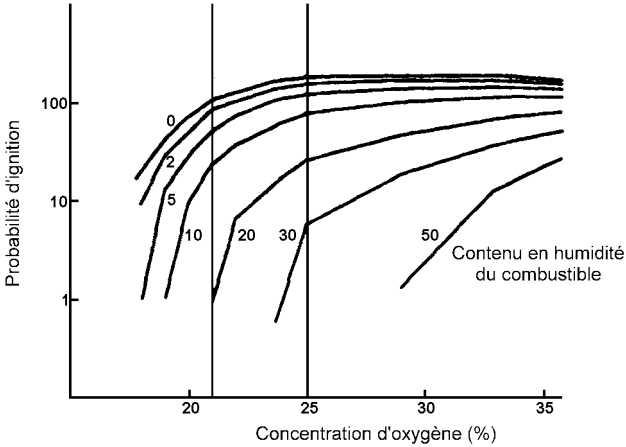

Figure 5 : Probabilité d'incendies en fonction de la concentration en oxygène de l'atmosphère (D.R.).

Un des aspects les plus riches de cette approche (replacer le vivant dans le temps géologique long), est de permettre une lecture d'événements contemporains dans un contexte très différent. Prenons comme exemple les incendies géants qui ravagent notre planète comme celui de Bornéo (1982-1983) qui a détruit l'équivalent de sept départements de notre pays (35 000 km^2). Il est maintenant démontré que depuis le Dévonien, il y a 375 millions d'années, des incendies gigantesques se sont régulièrement déclarés tout au long des ères géologiques. C'est ce que démontre l'analyse des charbons de bois fossiles disséminés à la surface de la Terre ainsi que l'étude des niveaux de suies dans les roches sédimentaires.

Bien souvent, la carbonisation préserve la structure et les détails du végétal pyrolysé, jusqu'à retrouver pétales et sépales de fleurs. **Certains auteurs finissent par lire dans ces accidents une régulation climatique nécessaire**.

L'OZONE, LE VIVANT ET LA CONQUÊTE CONTINENTALE

Un des problèmes clés que dut résoudre le vivant au cours de l'évolution fut de se protéger des radiations UV du Soleil : en effet, les macromolécules caractéristiques du vivant (protéines, acides nucléiques...) sont partiellement photolysées par les longueurs d'onde situées en dessous de 290 nm. Comme l'oxygène arrête les UV en dessous de

230 nm, il ne reste donc que l'intervalle 230-290 nm, qui est filtré en haute atmosphère par un écran d'ozone O_3, formé photochimiquement à partir de O_2. La couche d'ozone se trouve à une altitude de 25 à 30 km ; elle est générée indirectement par le vivant, puis détruite par des molécules traces provenant souvent du vivant. Il est clair que l'écran d'ozone a joué un rôle décisif dans les conquêtes continentales menées par le vivant océanique. On estime qu'entre 550 et 400 millions d'années avant l'époque actuelle (les 27 et 28 du « mois »), l'oxygène est passé de 2 à 20 % ; c'est dans cet intervalle que les premières plantes terrestres apparaissent. Rappelons qu'au moment de l'apparition des stromatolites, il y a plus de 3 600 millions d'années, l'oxygène atmosphérique est estimé à 0,2 %.

LE RÉSERVOIR CONTEMPORAIN DU CO_2

Nous avons dit qu'au départ, les atmosphères de Vénus, de Mars ou de la Terre possédaient une concentration en CO_2 très voisine, et supérieure à 90 %. C'est le vivant qui, en plus de 3 milliards d'années, a vidé l'atmosphère de la presque totalité de son CO_2, pour n'en laisser que quelques centaines de ppm. Le gaz carbonique primordial est piégé dans les carbonates sédimentaires.

Les climatologues qui ont analysé l'air contenu dans les carottes polaires ont découvert que cette faible concentration de dioxyde carbone avait cependant beaucoup varié dans le passé récent. Au cours de la dernière glaciation (il y a 18 000 ans) cette concentration était à peine de 200 ppm, alors qu'elle était peut être légèrement plus élevée qu'aujourd'hui au cours d'un épisode chaud, il y a 8 000 ans.

Actuellement, les médias attirent notre attention sur les hommes ou les événements, rarement sur les graphiques. Pourtant, celui qui situe la variation de la concentration en CO_2 sur notre planète en fonction du temps est particulièrement intéressant (*cf.* figure 6, page ci-après). CO_2 joue le rôle d'une valve énergétique à sens unique. Cette valve laisse entrer l'énergie du Soleil (courte longueur d'onde et lumière visible) qui vient frapper la surface de la Terre, laquelle renvoie une radiation de plus grande longueur d'onde qui sera absorbée par le gaz carbonique.

Quand augmente la quantité de CO_2, quelle qu'en soit l'origine, la surface de la Terre devient plus chaude : c'est l'effet de serre.

Des mesures précises ont été faites à Mauna Loa dans le Pacifique central (*cf.* figure 6, à gauche), puis sur une quinzaine de sites dispersés sur les deux hémisphères (*cf.* figure 6, à droite). Les grandes lignes des résultats sont commentées en légende. On peut cependant ajouter une surprise de taille : les oscillations observées dans l'hémisphère nord ne se retrouvent pratiquement pas dans l'hémisphère sud !

C'est tout simplement la traduction du fait que l'activité vivante des océans n'est pas proportionnelle à leur surface (loin s'en faut), et que le rapport des surfaces respectives terres émergées/océans est beaucoup plus faible dans l'hémisphère sud.

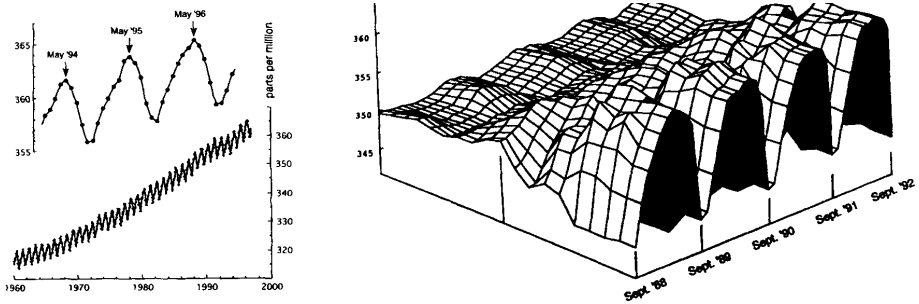

Figure 6 : Concentrations en CO_2 de l'atmosphère.

Figure de gauche : *Augmentation de la concentration de dioxyde de carbone atmosphérique : ces concentrations, exprimées en parties par million (ppm) de volume d'air sec, ont été enregistrées au sommet du Mauna Loa, à Hawaii. Chaque année, la concentration de* CO_2 *augmente en hiver, quand la respiration excède la photosynthèse, et diminue en été, quand la photosynthèse excède la respiration. L'augmentation constante de la concentration moyenne apparaît clairement sur une quarantaine d'années (D.R.).*

Figure de droite : *Données expérimentales fournies par quinze sites allant du pôle Sud jusqu'à 82° de latitude nord, au Canada. Les relevés mensuels mettent en lumière, sur quatre ans, le curieux phénomène de « respiration » de la biosphère, fort différent dans les deux hémisphères (D.R.).*

Après ces particularités concernant le réservoir atmosphérique de CO_2, il eut été possible de parler ici de la circulation de cette molécule dans la biosphère : un thème que nous aborderons plus loin.

CHIMIE ET CLIMAT

Nous enrichissons sans cesse nos connaissances sur le climat qui régnait sur Terre ce dernier million d'années, c'est-à-dire pendant la seconde moitié de l'ère quaternaire. Pour prendre un exemple proche de nous, le dernier maximum glaciaire a eu lieu il y a 18 000 ans, et la température globale moyenne est de 4,5 °C inférieure à l'actuelle. La banquise englobe alors l'Angleterre et le Danemark. Les glaciers recouvrent l'Amérique du Nord, l'Europe et la Sibérie et contiennent une telle quantité d'eau que le niveau des océans est abaissé de plusieurs dizaines de mètres (nous avons lu jusqu'à 120 mètres). La Terre continuellement gelée (permafrost) s'étend sur la France, une partie de l'Espagne, l'Europe de l'Est, le nord de l'Asie. Cet événement doit être rapproché de l'optimum climatique de l'Holocène, il y a 8 000 ans, avec une température globale moyenne de 2 °C supérieure à l'actuelle. Une grande partie du Sahara, enrichie par la mousson, n'est pas désertique mais bien verte et parsemée de points d'eau [8].

Deux types d'explications peuvent rendre compte de ces différences géantes de climats :

- Les premières, élaborées dès 1930 par MILANKOVITCH, relèvent de la mécanique céleste en prenant en compte les variations de l'excentricité de l'ellipse terrestre, de l'inclinaison de la Terre par rapport à son orbite et de la précession, qui définit la position de la Terre au moment des équinoxes.

♦ Les secondes, plus locales, tiennent compte des variations des teneurs en gaz carbonique et en méthane de l'atmosphère (ces deux gaz étant des acteurs essentiels de l'effet de serre... La température au sol augmente avec les concentrations de ces gaz).

La température au sol dépend à la fois des paramètres orbitaux (qui conditionnent l'ensoleillement) et de l'effet de serre.

Bien des auteurs ont tenté d'apprécier l'importance relative des facteurs astronomiques par rapport à ceux relevant de la chimie de l'atmosphère. Si l'effet de serre, lié à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO_2 et CH_4 est à l'origine d'une augmentation possible de la température moyenne à la surface de notre planète, une autre corrélation pourrait venir du couplage du diméthylsulfure avec la nébulosité.

On admet que le vivant est tenu, pour maintenir les conditions de son existence, de contrôler la circulation des produits métaboliques toxiques. En ce sens H_2S, dans certains milieux, se révèle être un composé éminemment toxique. Des processus biologiques entrent en jeu pour le méthyler, en donnant d'abord CH_3SH (que l'on consomme en mangeant des asperges) puis $(CH_3)_2S$, le dimethyl sulfure (DMS).

Concernant ce dernier, une intéressante corrélation est proposée, reliant développement du phytoplancton et nébulosité, dans une boucle où le diméthyl sulfure intervient : il est en effet produit dans l'eau par le phytoplancton. Dès qu'il diffuse dans l'atmosphère, le DMS est oxydé rapidement pour former finalement des aérosols riches en sulfates, qui favorisent les formations nuageuses par création de microgouttelettes.

Il est curieux d'attribuer à des phénomènes aussi subtils la possibilité de faire fonctionner d'énormes machineries atmosphériques. En fait, la photographie de « nuages » océaniques de phytoplancton (*cf.* figure 7) peut aider à convaincre. La boucle qui permettrait un tel phénomène est facile à lire (*cf.* figure 8).

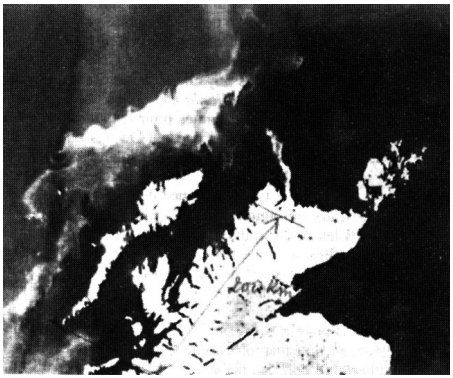

Figure 7 : Floraison géante d'une algue microscopique, *Emiliania huxleyi*, au nord de l'Écosse, vue depuis un satellite. La zone photographiée correspond à une largeur approximative de 400 km (D.R.).

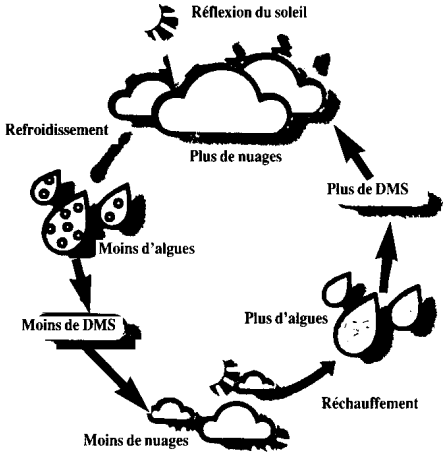

Figure 8 : Cycle du DMS (D.R.).

DE L'INVENTAIRE DU VIVANT...

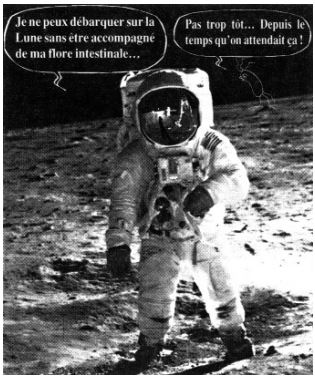

Figure 9

Quand nous parlons du vivant, nous avons tendance à penser aux espèces visibles, de l'arbre à l'homme en passant par le puceron. Pourtant, presqu'en même temps, Robert HOOKE (1635-1703) et Antonie VAN LEEUWENHOEK (1632-1723) en inventant le microscope, vont nous proposer un autre regard : le premier en 1665 est fasciné par le cloisonnement des végétaux et invente le mot cellule, le second, drapier de son état, émerveillé par tous les petits organismes qu'il observe, va accumuler les expériences et, pendant cinquante ans, correspondre avec la Royal Society ; c'est lui qui écrit : *« Jamais devant mes yeux n'est apparu spectacle plus plaisant que celui des milliers d'êtres vivants logés dans une gouttelette d'eau, qui se déplacent les uns parmi les autres, chacun animé de son mouvement propre... »*. Nous savons maintenant que notre existence ne serait pas possible sans la présence de myriades d'espèces, essentiellement microbiennes, qui agissent humblement mais efficacement à l'intérieur de chacun d'entre nous. L'exploit de Neil AMSTRONG, posant le premier le pied sur la Lune en est un remarquable exemple : cet exploit n'a pu être réalisé que grâce à la collaboration d'une collection d'espèces microbiennes fonctionnant à l'intérieur du corps humain. La comparaison du nombre de cellules microbiennes présentes dans chacun des habitats ramène les humains à une portion bien petite : 0,0000072 % seulement du total du vivant !

Le numéro spécial de *La Recherche* (février 1999) sur le recensement planétaire des microbes, change du tout au tout notre regard sur les importances relatives de ce que nous voyons (animaux, forêts, etc.) par rapport aux organismes situés aux frontières du vivant. On estime actuellement la masse de l'ensemble des microbes à la **moitié de la masse** de l'ensemble des êtres vivants.

AUTRES ÉLÉMENTS CLÉS DU VIVANT

Distribution des éléments

Après avoir donné une importance majeure aux océans, c'est-à-dire à l'eau et ses constituants (essentiellement l'oxygène) il est important de déterminer comment sont distribués et accessibles les quatre autres éléments clés (*cf.* figure 10 page ci-contre). Le soufre, dernier des quatre en termes de concentration dans la biomasse, est en tout cas indispensable au vivant : pensons à la méthionine, à la cystéine présentes dans les protéines. Or, 99,98 % du soufre de notre planète se trouve dans les océans.

L'azote accessible au vivant relève d'un seul réservoir. La majeure partie (99,4 %) se trouve dans l'atmosphère, le reste étant dissous dans les océans ou dispersé dans l'écorce terrestre.

Le cas du phosphore est encore différent : plus abondant dans la croûte terrestre (0,12 %) que le soufre (0,05 %) l'absence de petit carré au centre indique que la quantité totale de cet élément sommé sur les quatre réservoirs (océans, écorce terrestre, atmosphère et vivant) est négligeable par rapport aux autres éléments.

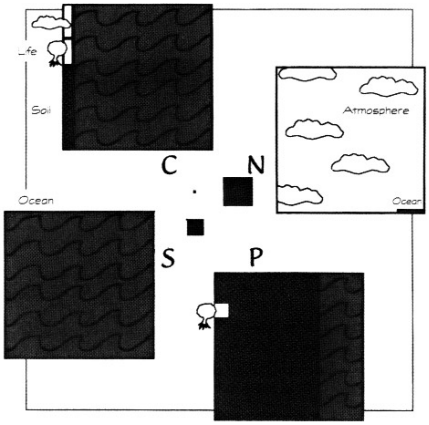

Figure 10 : Distribution de quatre éléments essentiels (C, N, P, S) entre atmosphère, vie, océan, sol. Dans chaque cas, on ne représente que les ensembles qui contiennent au moins 0,5 % de chaque élément. Les carrés noirs du centre montrent la quantité totale de l'élement considéré, sommée sur tous les milieux. On remarquera que la quantité de phosphore est insuffisante pour être représentée (D.R.).

Source et circulation de CO_2 dans le vivant

Les cycles terrestre et océanique du carbone sont illustrés dans la figure 11. Annuellement, environ 200 gigatonnes (10^9) de carbone sous forme de CO_2 passent de l'atmosphère à la biomasse sous l'action de la photosynthèse océanique et continentale. Cette biomasse est dégradée, et au bout du compte oxydée en CO_2 pour retourner à l'atmo-

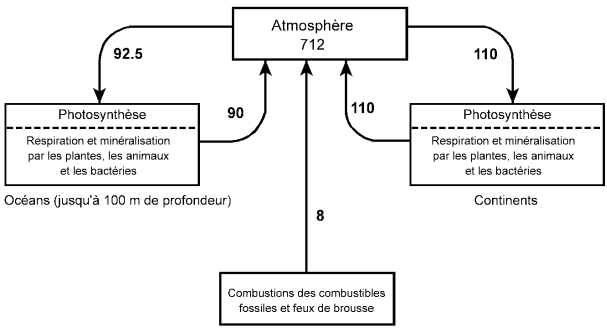

Figure 11 : Le cycle du carbone sur les continents et dans les océans. Pratiquement, le CO_2 de l'atmosphère en est la source unique. Les valeurs sont données en gigatonnes de carbone. Le réservoir de carbone de l'océan profond est estimé à 55 fois celui de surface, et sa participation est insignifiante (D.R.).

sphère. On estime que les champignons et les bactéries assurent 70 % de cette activité :

- Les premiers minéralisent le bois, et autres structures cellulosiques.
- Les secondes jouent un rôle crucial dans la dégradation, pour trois raisons essentielles :
  - La variété bactérienne est si grande qu'elle peut répondre parfaitement à la variété quasi infinie des composés que propose le vivant.
  - Les capacités d'adaptation des bactéries au milieu sont très étendues, et certaines espèces sont nommées extrêmophiles. On connaît ainsi des bactéries capables de se développer entre 90 et 110 °C, à des pH compris entre 3 et 1,5 mais aussi entre 9 et 11, enfin en présence d'une concentration d'oxygène nulle ou à 20 %.
  - Enfin, les bactéries possèdent une activité métabolique énorme, facilitée par leur petite taille (nous l'avons vu dans le premier article « Chimie et nature » [3]) qui augmente le rapport de la surface au volume et donc les performances cellulaires. Grâce à la fréquence de leurs mutations, elles possèdent un énorme potentiel d'acquisition de nouvelles activités. Bien plus, celles qui acceptent de vivre dans des conditions extrêmes (les archéobactéries) ne peuvent être cultivées hors de leur habitat. Pourtant, les chercheurs essaient depuis plus vingt ans (1977).

Un bon exemple des possibilités extraordinaires des bactéries est le processus nommé *lixiviation* : certaines bactéries convertissent le cuivre métallique sous une forme soluble, laquelle sera entraînée par les eaux de drainage. C'est ainsi que certaines de ces bactéries sont utilisées pour récupérer des milliers de tonnes de cuivre, à partir de milliards de tonnes de minerai pauvre ! Ces organismes sont chimiolithotrophes, parce qu'ils tirent leur énergie de l'oxydation de surfaces minérales (fer ferreux, soufre, sulfures...) et sont aussi souvent autotrophes, en ce sens que la synthèse de leurs constituants cellulaires se fait à partir de CO_2.

Thiobacillus ferrooxidans possède à lui tout seul toutes ces vertus, et en plus se développe très bien en milieu acide, avec de préférence des températures comprises entre 20 et 35 °C. En bref, dans la figure qui schématise la circulation de CO_2, il y a mille manières pour le vivant de fermer la boucle.

Le soufre

Les volcans émettent de l'anhydride sulfureux (SO_2) et de l'hydrogène sulfuré (H_2S). Ces émissions rejettent en moyenne entre 10 % et 20 % du flux naturel total de soufre gazeux vers l'atmosphère, mais elles varient beaucoup dans le temps et dans l'espace.

Des composés soufrés volatils sont également émis, comme nous l'avons déjà vu, par les organismes vivants marins et terrestres. Ainsi, les organismes qui ont donné naissance aux stromatolites les plus anciennes (3,5 milliards d'années) et qui ont abandonné le carbone organique du kérogène sont considérés comme les ancêtres des bactéries photosynthétiques qui ne produisent pas d'oxygène. Les représentants actuels de ces bacté-

(3) Voir BUP n° 843, avril 2002, p. 657-675.

ries, particulièrement les bactéries à soufre (verte et pourpre) vivent dans des environnements anaérobies et utilisent H_2S plutôt que l'eau comme source d'hydrogène pour passer de CO_2 aux sucres $(CHOH)_n$. Les vastes dômes de soufre trouvés en Louisiane et au Texas témoignent de cette vie primitive.

Plusieurs espèces bactériennes qui utilisent des composés soufrés comme oxydants et donneurs d'hydrogène peuvent coopérer pour exécuter des cycles de soufre. Comme on le voit sur la figure 12a, *Desulfovibrio desulfuricans* peut utiliser l'acide sulfurique pour respirer, processus qui libère de l'hydrogène sulfureux (H_2S) à la place de l'eau.

Actuellement, le flux de soufre produit par les activités humaines égale le flux naturel du soufre (*cf.* figure 12b), et cette perturbation influe vraisemblablement sur le climat : l'augmentation de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone n'a pas réchauffé la Terre autant que l'on pouvait s'y attendre, car la couverture nuageuse a sans doute augmenté avec la concentration atmosphérique de diméthyl sulfure.

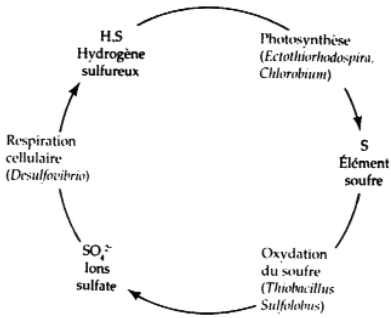

Figure 12a : Plusieurs espèces bactériennes qui utilisent des composés soufrés comme oxydants et donneurs d'hydrogène peuvent coopérer pour exécuter des cycles du soufre, dont un exemple est illustré ici.

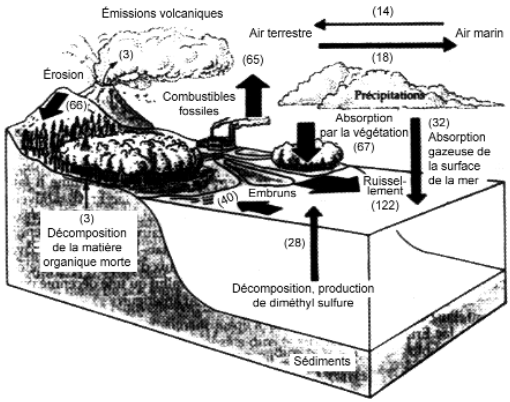

Figure 12b : Le cycle du soufre : les taux de transfert de soufre, exprimés en multiples de 10^9 kg par an, incluent à la fois les flux naturels et les flux d'origine humaine. Le total des flux est le double de ce qu'il était un siècle plus tôt, principalement à cause de l'utilisation des combustibles fossiles (D.R.).

Du phosphore...

Nous savons que six éléments chimiques (C, H, N, O, P, S) forment l'essentiel de la trame du vivant. Il n'est donc pas concevable que le vivant puisse fonctionner en l'absence de l'un d'entre eux. Cependant, au caractère indispensable de chacun des éléments précités, s'ajoutent d'autres facteurs comme l'abondance et/ou l'accessibilité. Des molécules comme H_2O, CO_2, H_2S, N_2, SO_4^{2-} permettent en principe la circulation des éléments clés.

Pour le phosphore qui, parmi les six, est après le soufre le moins abondant dans l'écorce terrestre et ne dispose pas de composé volatil, il y a un problème d'accessibilité.

Quand nous écrivons que le phosphore est l'élément limitant le développement du vivant, c'est parce que bien des données expérimentales le démontrent. Ainsi dans les océans, et plus particulièrement dans la zone photique (les cent premiers mètres) la quantité de phosphore directement assimilable par le vivant est très faible, voire presque nulle (*cf.* figure 13, à gauche). À peine perdu par le vivant, le phosphore est donc immédiatement récupéré, toujours par le vivant. Il peut être ainsi réutilisé *jusqu'à mille fois* avant de disparaître dans les grands fonds. De la même manière, à la surface d'un étang, quelques gouttes d'une solution de phosphate marqué disparaissent dans le vivant quelques secondes après leur immersion. Cette même expérience se reproduit à l'échelle de la planète quand les courants océaniques profonds butent contre les plateaux continentaux, et que des quantités énormes de phosphore remontent dans les zones côtières (« upwellings »).

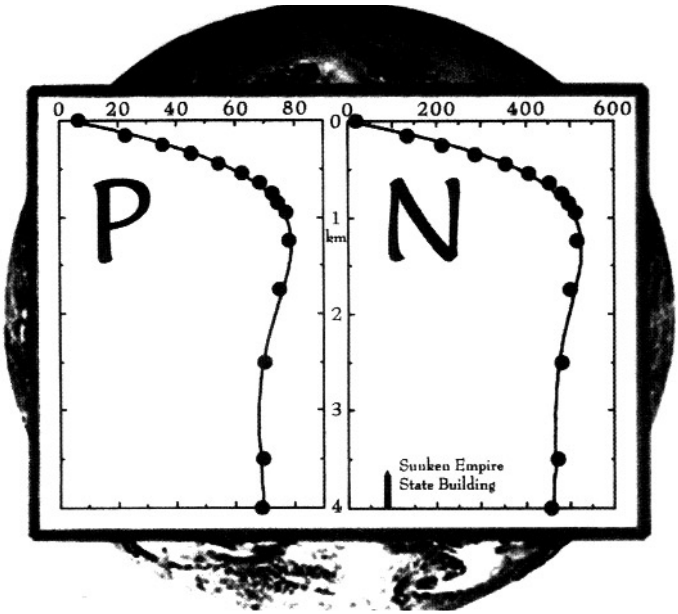

Figure 13 : Concentration des ions phosphore et azote pour l'ensemble des océans. La concentration est exprimée en mg/m^3 d'eau en fonction de la profondeur. L'échelle horizontale de l'azote a été multipliée par le facteur 6,7 (D.R.).

Les dérivés de l'acide phosphorique jouent un rôle clef dans beaucoup de domaines du vivant : l'ADN est responsable de la conservation du code génétique, les ARN permettent l'utilisation et le transfert de l'information contenue dans l'ADN, les ADP et ATP jouent le rôle de navettes transférant l'énergie, enfin l'AMP cyclique permet le passage dans la cellule de l'information arrivant sur les membranes cellulaires.

Cette prédominance s'est imposée pour des raisons chimiques, et nous n'évoquerons qu'un seul exemple. Quelles raisons impératives font que dans l'ADN les ponts

entre nucléosides sont construits avec une structure diesters phosphorique ?

Si le phosphore a fait partie de « la bande des six » éléments nécessaires au vivant, c'est pour des raisons impératives, qu'aucun autre élément ne pouvait remplir. Quelles sont donc les exigences imposées par la vie ?

Il fallait d'abord un élément au moins divalent pour pouvoir assembler la suite des nucléosides constituant le programme génétique. Autre exigence, les deux fonctions esters formées ne pouvaient être hydrolysables, sous peine de voir le programme détruit. L'évolution a tenu compte de cette contrainte puisque le groupement hydroxyle -OH présent dans le ribose de l'Acide RiboNucléique a disparu dans l'Acide DesoxyriboNucléique.

L'hydrolyse intramoléculaire est rendue très improbable et l'enchaînement maintenu. Enfin, les groupements sont protégés d'une attaque nucléophile venant de l'extérieur par le caractère anionique de la troisième fonction acide de acide phosphorique. Ainsi, la fiabilité chimique indispensable du programme se trouve maintenue sur des durées correspondant aux besoins des espèces.

Cette construction du vivant imposée par les propriétés chimiques n'avait qu'un seul défaut : l'accessibilité aux phosphates est toujours difficile, le phosphate est relativement rare tandis que plusieurs de ses sels sont insolubles : ce sera donc bien l'élément limitant dans la construction du vivant.

Une découverte inattendue datant de 1993 est la démonstration que le très toxique et nauséabond phosphane PH_3 (les anglais disent *repulsively odoriferous*) est présent dans le cycle biogéochimique du phosphore, couplé à celui du méthane. La préparation biogénique de PH_3 a été conduite en cultivant des bactéries méthanogènes sur des fèces de différents animaux. La production couplée de méthane et de phosphanes a été clairement démontrée et dépend naturellement de la richesse en phosphate du régime alimentaire de l'animal. On en trouve davantage chez le mangeur de viande que chez le végétarien et une corrélation possible avec le cancer du tube digestif a été proposée. Ramenée à l'échelle de notre planète, la production estimée est de l'ordre de 40 000 tonnes par an, soit six bons grammes par habitant, bien plus qu'il n'en faudrait pour intoxiquer mortellement chacun d'entre nous. Pour l'anecdote, cette découverte permet enfin de donner une explication simple à l'existence des feux follets : la production de méthane et de phosphane (ainsi que des traces de $H_2P\text{-}PH_2$) sont couplées dans un rapport de 10000/1 et l'on comprend que $PH_3\text{-}H_2P\text{-}PH_2$ autoinflammables à l'air soient capables, dans une atmosphère riche en méthane, d'auto-enflammer ce dernier.

...au couplage phosphore-azote

La figure 13 ci-contre présente la concentration des ions phosphore et azote (essentiellement les phosphates et les nitrates) pour les océans Pacifique, Indien et Atlantique, qui, dans les faits, ne forment qu'une même entité. Les valeurs disposées en abscisse représentent la quantité de l'élément présent, exprimée en mg par m^3 d'eau. Afin d'illustrer un étonnant parallélisme avec les résultats obtenus pour le phosphore, l'échelle hori-

zontale de l'azote (à droite) a été multipliée par le coefficient 6,7. Ce coefficient n'a pas été choisi au hasard, mais correspond à la valeur moyenne du rapport N % / P % dans le plancton. Pourquoi cette étonnante correspondance n'est-elle pas observée avec le calcium, le soufre ou le magnésium ? Vraisemblablement parce que l'azote est le second élément limitant dans la construction du vivant.

Dans le corps humain, le rapport N/P est seulement de trois. Cette notable différence est sans doute la faute d'Archimède : le vivant, dès qu'il l'a pu, c'est-à-dire dès que les continents ont été protégés de l'action destructrice des UV par l'ozone, est passé de l'empire océanique aux continents. Ce faisant, il a dû quitter le monde de l'apesanteur, et, en l'absence de poussée d'Archimède, construire des structures rigides pour que les espèces colonisant la terre ferme puissent se dresser : ce sont par exemple les troncs des arbres ou les squelettes des vertébrés. Le squelette de l'homme est ainsi essentiellement composé de phosphore. Une manière d'expliquer que pour passer du plancton, espèce qui flotte et vagabonde dans une bienheureuse apesanteur, à l'homme debout, en proie à la gravité, il faut bien se construire un squelette, et donc diminuer le rapport N/P.

C'est avec plaisir que nous pensions commencer ici le cycle de l'azote, aussi intéressant que les cycles déjà présentés. Mais cet article, limité en volume, arrive à son terme. Nous pouvons cependant signaler que ce cycle est particulièrement riche en dérivés intermédiaires, et demande de savantes explications pas toujours complètement connues. Un thème de recherche prometteur, pour les biochimistes du futur...

CONCLUSION

À l'heure actuelle, les scientifiques admettent, après VERNADSKY et LOVELOCK, que la vie est une force géologique majeure, influençant profondément la dynamique et l'histoire de **l'écorce** terrestre.

C'est ainsi qu'il a été possible d'imaginer un graphe évaluant l'importance du rôle de la vie dans l'apparition et le maintien de conditions de températures favorables à la surface de la Terre (*cf.* figure 14 ci-contre). Autour de ce concept essentiel, et grâce à l'apport des connaissances accumulées en géologie, chimie et biologie, nous assistons à un dialogue entre ces trois domaines de la connaissance, orienté vers des thèmes de recherche renouvelés. L'intégration dans un même champ de recherche de ces trois disciplines permet de jeter un regard nouveau sur les problèmes cruciaux de l'écologie actuelle. Il est certain que la connaissance détaillée des variations climatiques de ces 20 000 dernières années apporte, même sur le court terme (un ou deux siècles) *« des instruments au service des politiques »* (Nicole PETIT-MARIE). D'autre part, le vivant serait-il capable de réguler les déséquilibres actuels, ou bien ces déséquilibres sont-ils trop marqués en évoluant sur des échelles de temps trop courtes ?

Pour en terminer, signalons que le domaine de cet article est si vaste que, très certainement, nous n'avons pas toujours pu éviter erreurs ou contradictions, ce qui n'a rien enlevé au plaisir de l'écrire !

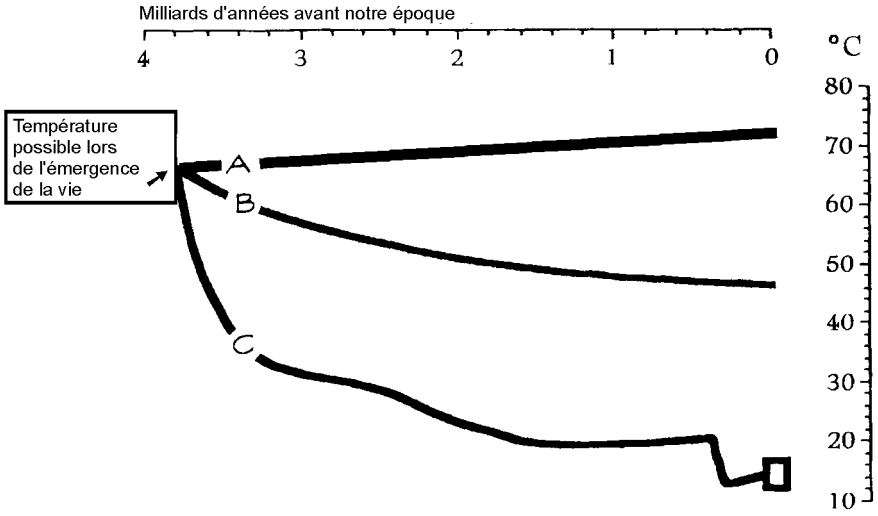

Figure 14 : Évolutions possibles de la température de la Terre en prenant en compte trois hypothèses :
A : L'actualité du Soleil augmente de 30 %.
B : A+ l'activité des volcancs baisse (divisée par 3), et la surface des continents augmente (multiplié par 4).
C : B+ action de la biosphère, d'abord océanique puis continentale (D.R.).

L'auteur du *Dictionnaire du citoyen ou abrégé historique, théorique et pratique du commerce* de 1761, écrit (tome 1, p. 61) *« Les Portugais reçoivent encore du Brésil des dents d'éléphants »*. On sait que le Brésil n'a jamais vu l'ombre d'une trompe d'éléphant et que les Brésiliens seraient bien en peine s'il leur fallait trouver et exporter les dents de ce sympathique animal ! Que le lecteur soit indulgent si, sans le vouloir, nous avons su en trouver quelques-unes...

BIBLIOGRAPHIE

[1] VERNADSKY Vladimir I. *The biosphère*. Éditions Copernicus, 1998, avec 400 commentaires de I. MACMENAMIN et 300 références.

[2] LOVELOCK J.E. *La Terre est un être vivant, l'hypothèse Gaia*. Éditions du Rocher, 1990.

[3] WESTBROEK P. *Vive la Terre*. Éditions du Seuil, 1998.

[4] LAMY M. *La biosphère*. Dominos Flammarion, 1996.

[5] PURVES W.K., ORLANS G.H. et HELLER H.C. *Le monde du vivant*. Flammarion, 1994, 1224 pages.

[6] VOLK T. *Gaia's body, toward a physiology of earth*. Éditions Copernicus, 1997, 269 pages.

[7] RAMADE F. *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*. Édisciences Intemational, 1993, 822 pages.

[8] PETIT MAIRE Nicole. *Compte-rendu Académie des Sciences*, 25 février 1999.

Et des remerciements aux dizaines d'auteurs que nous avons lus sans pouvoir les citer, faute de place.