

## LECTURE

### **La Biosphère au service de l'Atmosphère**

par MARCEL NICOLET  
Correspondant de la Classe

Il y a quatre milliards d'années la planète sur laquelle nous sommes nés était déjà formée alors que son atmosphère dans laquelle nous vivons n'existait pas encore. Quel que soit le point de vue adopté concernant le mécanisme de la formation de la Terre et du système solaire il y a quatre milliards et demi d'années, on peut affirmer qu'il ne peut être question d'une atmosphère terrestre originelle. En effet, la trop faible abondance dans l'atmosphère terrestre des gaz nobles tels que le néon et l'argon-36 par rapport à leur abondance cosmique normale révèle leur exclusion dans l'édification de l'atmosphère après la formation de la Terre. Celle-ci pourrait donc être due à l'agglomération de groupes de particules solides plutôt qu'à la condensation de nuages gazeux. Dans ce dernier cas, non seulement l'hydrogène et l'hélium devaient s'être échappés dans l'espace, mais également l'azote et le carbone qui sont actuellement plus rares que d'autres constituants terrestres alors qu'ils sont relativement lourds. Il n'y a que l'oxygène, qui échappe à la règle générale, sans doute par suite de son aptitude à pénétrer comme composant dans les corps solides. Peut-être devrait-on reconnaître le rôle tout particulier de l'argon de masse 40 qui est présent dans l'air dans la proportion d'à peu près un pourcent. Il est, en effet, le produit de la désintégration du potassium radioactif qui était particulièrement abondant au moment de la formation du système solaire. Ainsi, la production d'argon au cours des 500 premiers millions d'années après la formation du système solaire est pratiquement égale à la quantité totale d'argon que contient actuellement notre atmosphère. Pourquoi, l'argon ne pourrait-il pas avoir été le premier constituant de l'atmosphère terrestre?

En tout cas, il apparaît que l'atmosphère terrestre s'est constituée après la formation du globe soit que les éléments volatiles, qui la composent aujourd'hui, résultent d'une émanation du sol ou soit qu'ils correspondent à un apport de l'extérieur. Dans le cas d'un dégazage, on peut penser tout naturellement à l'effet des émanations volcaniques. Toutefois, un tel processus de formation a dû être assez rapide tout en étant continu si l'on se réfère à la présence de roches sédimentaires il y a plus de trois milliards d'années. En d'autres termes, à ce moment là, l'atmosphère et l'hydrosphère existaient déjà en présence de la lithosphère. Cependant, en même temps, il faut noter l'absence de l'oxygène qui n'est apparu il n'y a que quelque deux milliards d'années environ. D'un point de vue quantitatif, le problème de l'apparition de l'oxygène dans notre atmosphère n'est pas définitivement résolu. S'agit-il surtout d'oxygène produit par la dissociation de la vapeur d'eau provenant des océans ou est-ce uniquement le résultat de la production d'oxygène par photosynthèse? Il faut bien admettre au départ l'effet inévitable de la dissociation de la vapeur d'eau par suite de la présence de l'hydrosphère représentée dans ce cas surtout par les océans. Mais, il faut reconnaître que la photosynthèse est alors intervenue pour constituer l'oxygène de notre atmosphère. Ainsi, on découvre que l'apport d'oxygène par la biosphère a été une action importante qui a conduit à la formation définitive de notre atmosphère dans sa composition actuelle. D'un point de vue strictement géologique, la présence de l'oxygène dans notre atmosphère est étonnante. On sait, en effet, que la Terre est sous-oxydée et que les gaz émanant de la croûte terrestre ne contiennent pas d'oxygène libre; au contraire, il y a consommation continue de l'oxygène de l'air dans des réactions d'oxydation comprenant, par exemple, les émanations volcaniques ou toutes les roches altérées par le temps. Il faut admettre que la quantité d'oxygène, qui a été produite au cours des temps géologiques par la photodissociation de la vapeur d'eau, n'est pas suffisante pour expliquer tous les phénomènes d'oxydation qui ont eu lieu à la surface du globe. D'ailleurs, aux 240 grammes par  $\text{cm}^2$  d'oxygène que contient aujourd'hui notre atmosphère s'opposent seulement quelque 150 grammes par  $\text{cm}^2$  produits en 3 milliards d'années par la photodissociation de la vapeur d'eau, suivant les normes actuelles, alors que la fossilisation du carbone a requis certainement la production de quelque 3.500 grammes d'oxygène par  $\text{cm}^2$ .

Aujourd'hui, on ne peut se faire encore qu'une image imparfaite de la distribution de la production de l'oxygène au cours des époques géologiques puisqu'elle dépend de l'évolution de la photosynthèse. Peut-être peut-on dire que l'oxygène est apparu comme élément de l'atmosphère il y a quelque deux milliards d'années. Mais, une longue période a été nécessaire allant jusqu'à l'époque du cambrien, il y a 500 millions d'années, pour que la concentration d'oxygène puisse atteindre un ou quelques pourcents de son niveau actuel. Néanmoins, dès ce moment l'oxygène soumis à la photodissociation du rayonnement solaire produisait des atomes d'oxygène conduisant à la formation d'ozone atmosphérique. Cette couche d'ozone devait déjà être suffisante pour assurer la protection des êtres vivants contre le rayonnement ultraviolet abiotique. En fin de compte, on peut être assuré que l'oxygène avait atteint son niveau actuel il y a seulement quelque 50 millions d'années et nous dirons que depuis lors cette concentration a été maintenue à son optimum par et pour la biosphère.

Aujourd'hui, nous sommes tous convaincus qu'il existe des relations très profondes de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la lithosphère avec la biosphère. Ainsi en passant par les plantes et étant restituée également par les animaux, la vapeur d'eau présente, un cycle d'échange d'une durée de vie de l'ordre de 2.000.000 d'années. L'oxygène, qui est produit dans l'atmosphère, est recyclé environ tous les deux mille ans. Quant à l'anhydride carbonique il ne requiert que quelque 300 ans pour deux passages successifs dans la biosphère. Même l'azote, bien que ne pouvant être utilisé directement par la majeure partie des êtres vivants, a son rôle à jouer, car il doit être « fixé » par des organismes spécialisés. Aujourd'hui, on doit dire que la quantité totale d'azote fixé par l'ensemble écologique est atteinte et sera bientôt nettement dépassée par les produits de la fixation industrielle. Déjà, en beaucoup d'endroits, celle-ci conduit à un surplus par rapport à la dénitrification et ainsi à un afflux du sol vers les rivières qui force les algues et augmente l'activité biologique générale. Celle-ci, en retour, requiert un surplus d'oxygène qui doit être pris à l'eau. De là, le phénomène d'eutrophication déjà bien répandu. Il peut donc y avoir une malfaçon dans la distribution des constituants de l'atmosphère si la production industrielle peut dépasser les possibilités de la biosphère. Nous venons de voir que des composés de l'azote, qui peuvent être utiles en fertilisant le sol, deviennent nocifs lorsqu'indi-

rectement ils suppriment le poisson. Dans le même ordre d'idées, l'oxygène et l'anhydride carbonique sont utiles aux organismes vivants alors que leurs produits ou sous-produits, respectivement l'ozone et le monoxyde de carbone, sont toxiques. C'est en n'importe quel terme le problème de la pollution de l'air. Mais celui-ci ne peut être résolu que par une étude aéronomique profonde par laquelle on détermine les divers processus physiques et chimiques intervenant au départ.

Il faut d'abord commencer par l'examen du processus fondamental responsable de l'ensemble des phénomènes. Sous l'effet du rayonnement ultraviolet de longueurs d'onde inférieures à 3.200 Å, l'ozone est soumis à un mécanisme de dissociation portant l'atome d'oxygène résultant dans un état appelé  $^1D$ . Par suite de la présence de l'azote, qui constitue 78 % de l'air que nous respirons, ces atomes excités sont généralement désactivés, retournent ainsi à l'état normal et reforment immédiatement l'ozone. Cependant, une petite fraction de ces atomes d'oxygène excités subsiste et entre en contact avec la vapeur d'eau  $H_2O$ , le méthane  $CH_4$  et l'hydrogène  $H_2$ . Le résultat est une immédiate réaction produisant des radicaux libres OH qui sont susceptibles de réagir à nouveau avec le méthane et l'hydrogène. Cette destruction continuelle du méthane, qui apparaît dans toute la troposphère depuis le niveau du sol jusque dans la stratosphère, conduit à la production finale du monoxyde de carbone CO. L'atome de carbone résultant de la destruction de méthane ne peut que conduire directement ou indirectement au monoxyde de carbone.

Nous savons que le méthane est produit par décomposition bactérienne dans les marais, dans les champs de riz et en général dans les régions humides tropicales. Ce gaz des marais est aussi le résultat de la digestion animale et, en général, de tous les effets de la décomposition. La production annuelle est de quelque deux milliards de tonnes, c'est-à-dire à peu près la moitié de la quantité totale existant dans l'atmosphère. Donc la durée de vie moyenne du méthane dans l'atmosphère est de l'ordre de deux ans. Ce méthane détruit par réaction chimique conduit en définitive à la production annuelle d'au moins 3.000 millions de tonnes d'oxyde de carbone alors qu'il n'y a que 500 millions de tonnes d'oxyde de carbone dans l'air que nous respirons. On voit donc que la durée de vie du CO dans l'atmosphère doit être inférieure à deux mois. D'autre part, la production industrielle du CO, en particulier par l'automobile, ne s'élève à peu près qu'à 200 millions

de tonnes, c'est-à-dire plus de 10 fois moins que la production naturelle. On voit ainsi comment la biosphère travaille pour l'atmosphère. Ainsi, l'alarme donnée au sujet de la pollution par le monoxyde de carbone ne vaut que pour la ville où le mouvement automobile est trop dense ou, bien que l'on n'y pense trop peu, pour la tabagie trop prononcée. En bref, le cycle méthane-oxyde de carbone est le suivant : la biosphère produit au niveau du sol le méthane  $\text{CH}_4$  qui est détruit par le radical OH produit sous l'effet du rayonnement solaire dissociant l'ozone. Cette réaction conduit finalement à la formation du monoxyde de carbone CO qui réagit encore avec le radical OH pour former, en fin de compte, l'anhydride carbonique  $\text{CO}_2$ .

L'anhydride carbonique est l'élément minoritaire le plus abondant dans l'atmosphère terrestre. Sa masse totale est de 2.000 milliards de tonnes dont la moitié passe chaque année par l'océan. Par suite d'une production annuelle industrielle de l'ordre de 10 milliards de tonnes, l'anhydride carbonique dans l'air augmente chaque année d'environ 5 milliards de tonnes. Cet accroissement annuel correspond à une augmentation de 1/4 % de l'anhydride carbonique de l'air qui n'est pas compensé à l'occasion de son passage tous les deux ans de l'atmosphère dans l'océan. On assiste donc à un accroissement continu du  $\text{CO}_2$  depuis le début de l'ère industrielle.

Un des aspects les plus inattendus de l'activité de la biosphère est celui de la production de vapeur d'eau provenant de la dissociation du méthane dans la stratosphère. En effet, lors de la destruction du méthane par le radical OH, les quatre atomes d'hydrogène de  $\text{CH}_4$  sont utilisés à la formation de deux molécules de vapeur d'eau  $\text{H}_2\text{O}$ . A chaque molécule  $\text{CH}_4$  détruite se substitue donc une molécule d'oxyde de carbone et deux molécules de vapeur d'eau. On peut calculer que cette destruction du méthane arrivant dans la stratosphère introduit une quantité de vapeur d'eau qui ne serait pas inférieure à celle que pourrait fournir une flotte de 500 avions supersoniques du type Concorde volant 7 heures par jour. Encore une fois, la biosphère permet d'entrevoir des mécanismes physiques et chimiques qui protègent l'atmosphère. Ainsi, c'est le méthane qui fournit chaque année à la stratosphère quelque 50 millions de tonnes de vapeur d'eau qui retourne en fin de compte à la troposphère.

La présence de la vapeur d'eau dans la stratosphère et surtout plus haut dans la mésosphère, conduit à la formation de radicaux libres

OH et HO<sub>2</sub>, qui non seulement jouent un rôle au-delà de 50 km sur la distribution de l'ozone atmosphérique, mais influencent la formation de l'hydrogène moléculaire H<sub>2</sub> et de l'hydrogène atomique H. Cette formation d'hydrogène a une profonde répercussion sur la structure de la haute atmosphère et en particulier sur la couronne terrestre qui est exclusivement constituée d'hydrogène atomique s'étendant à plusieurs dizaines de milliers de km. Ainsi, l'atmosphère terrestre jusqu'à ses confins est liée par sa composition à la biosphère qui n'existe qu'au niveau du sol.

Un autre aspect important de l'action de la biosphère est celui des effets de certains composés de l'azote. A la suite de l'action des bactéries dans le sol, l'oxyde azoteux N<sub>2</sub>O est déchargé dans l'atmosphère. Quoique soumise à la photodissociation par le rayonnement solaire, cette molécule pénètre dans la stratosphère avec un flux de l'ordre de 1 milliard de molécules par cm<sup>2</sup> et par seconde. Une fraction d'environ 10 % de ce flux de molécules est soumise, comme dans le cas du méthane et de la vapeur d'eau, à une réaction avec les atomes excités O(<sup>1</sup>D) produits lors de la photodissociation de l'ozone. Cette réaction entre l'oxyde azoteux et l'atome excité d'oxygène donne lieu à la naissance de deux molécules de monoxide d'azote NO. Ainsi, l'action bactérienne dans le sol conduit à la production dans la stratosphère de molécules qui ne pourraient y exister par la voie normale photochimique. En effet, les oxydes d'azote, qui sont produits dans l'ionosphère au-delà de 100 km, ne peuvent être transportés au travers de la mésosphère, de 85 à 50 km, où ils sont détruits par la photodissociation.

En tout cas, la présence du monoxide d'azote NO conduit à des réactions importantes dans la stratosphère. Il y a un équilibre photochimique immédiat entre le monoxide d'azote NO et le peroxyde d'azote NO<sub>2</sub>. Ces deux molécules constituent alors un cycle catalytique qui détruit l'ozone. En d'autres termes, cela veut dire que s'il y avait une concentration trop élevée d'oxyde d'azote dans la stratosphère, la couche d'ozone, qui nous protège du rayonnement ultraviolet abiotique du soleil, pourrait être partiellement détruite. D'où le danger souvent proclamé de la pollution de la stratosphère par les avions supersoniques qui produisent par leur combustion des oxydes d'azote. En effet, si on effectue le calcul de la production d'une flotte de cinq cents avions supersoniques volant chaque jour pendant sept

heures, on arrive à la conclusion que l'introduction artificielle d'oxydes d'azote dans la stratosphère est du même ordre de grandeur que celle qu'introduit la biosphère sous forme d'oxyde azoteux qui réagit pour produire *in situ* le monoxide d'azote. Encore une fois la biosphère se manifeste à bon escient au profit de l'atmosphère.

En fin de compte, on s'aperçoit que le radical OH résultant de la décomposition de la vapeur d'eau s'allie avec le peroxyde d'azote  $\text{NO}_2$  pour former l'acide nitrique  $\text{HNO}_3$ . Cet acide nitrique s'écoule dans la troposphère où il passe dans la pluie avant d'arriver au sol où il devient un nitrate.

On pourrait multiplier les exemples d'actions essentielles de la biosphère relevant du maintien de l'équilibre de l'environnement terrestre. Mais, comme toute activité humaine engendre des déchets, et en particulier celle qui relève de la grande industrie pour laquelle n'est valable que ce qui se vend, il faut introduire une contrepartie à l'agression de l'environnement. C'est pourquoi, en abandonnant au pragmatisme administratif et politique le soin de la rédaction d'édits concernant la « pollution », il faut la décaper de ses mythes par des recherches scientifiques adéquates susceptibles de fixer tout seuil s'accordant avec la vie normale de la population.