

Modifications affectant les éléments dans la nature

par V.S. Venkatavaradan*

La nature offre une variété infinie de choses qui revêtent une variété infinie de formes, de couleurs et d'états. En dépit de propriétés variées, cette multitude d'objets ne renferme que quelque quatre-vingt-dix éléments fondamentaux, de l'hydrogène à l'uranium. Dans la plupart des cas, quelques-uns de ces éléments seulement entrent dans leur composition. Cette grande diversité de la matière dans la nature est due à l'abondance relative des éléments et à leurs possibilités de combinaison. D'un côté, nous trouvons des matières pures et extrêmement simples comme le diamant, qui ne contient que des atomes de carbone, de l'autre, nous trouvons des roches d'une infinie complexité, qui renferment presque tous les éléments, de l'hydrogène à l'uranium.

A quoi attribuer une telle diversité de la matière dans la nature? Pourquoi cette dernière n'est-elle pas homogène? Même si l'on pouvait trouver un échantillon de matière homogène contenant tous les éléments, il finirait par se désagréger pour devenir hétérogène. Dans des conditions données (température, pression, concentration appropriées, par exemple), la transformation d'un mélange homogène en un mélange hétérogène n'est qu'une question de temps. On sait que la raison de ces modifications subies par les éléments dans la nature repose dans les forces mêmes de la nature — forces gravitationnelles, électromagnétiques, nucléaires, etc.

On peut dire, grosso modo, que les causes principales de modification sont soit physiques, soit chimiques. Outre ces causes *naturelles*, il en existe évidemment d'autres, *artificielles*, qui ont pour effet de modifier la texture d'un système donné. Ce sont ces forces naturelles qui président à la formation de planètes dont la composition varie. Ce sont elles aussi qui donnent naissance aux différentes sortes de roches de la Terre. Toutes les modifications perceptibles sur la Terre et dans le système solaire, dans les étoiles et dans notre galaxie, et même dans tout l'Univers peuvent s'expliquer comme étant dues à l'action d'une ou plusieurs de ces forces. En dépit de leur différence de nature, tous les objets naturels existent en abondance, ce qui prouve une certaine similarité dans leur agencement — qu'il s'agisse de roches terrestres, d'échantillons lunaires, de météorites ou d'étoiles. En général, les éléments légers sont plus abondants et, à partir du fer, l'abondance des éléments les plus lourds diminue à peu près exponentiellement avec des variations caractéristiques. Bien entendu, certaines variations individuelles sont également caractéristiques; les roches lunaires, par exemple, sont plus riches en titane et en fer que les roches terrestres; les météorites sont riches en métaux nobles comme l'or, l'indium et l'osmium. Même parmi les roches terrestres, on constate des différences de composition selon le mode de formation. Certaines étoiles sont riches en métaux, d'autres ne le sont pas. La cosmochimie a pour objet l'explication de ces variations; celles-ci ont une cause, parfois unique, mais le plus souvent multiple. L'étude de ces variations dans la composition (en isotopes et en éléments) permet de déceler les processus en jeu, tant pour l'époque actuelle que pour le passé lointain.

* M. Venkatavaradan est membre de l'Institut Tata de recherche fondamentale à Bombay. Le présent article est la traduction d'un article paru dans *Nuclear India*, Vol. 14, No 10.

INTERACTIONS NUCLEAIRES DANS L'UNIVERS

Les principales causes de modification des éléments dans la nature sont les interactions nucléaires. Sans ces dernières, l'univers ne contiendrait peut-être bien que de l'hydrogène. C'est à partir de l'hydrogène que sont créés les autres éléments par des réactions nucléaires à l'intérieur des étoiles. Dans le Soleil et dans les étoiles, la transmutation nucléaire des éléments légers en éléments plus lourds entretient la combustion. Sur la Terre et sur les autres planètes, la transmutation des radionucléides à longue période se poursuit toujours. Sans la chaleur dégagée au cours de leur désintégration, l'histoire géologique de la Terre serait différente. Même dans le vide supposé de l'espace interstellaire les rayons cosmiques subissent des transmutations en réagissant avec la matière interstellaire finement dispersée et produisent des éléments caractéristiques, de poids léger et moyen, qui permettent de se faire une idée de leur origine, de leur âge, etc. Si les forces nucléaires sont responsables de la présence d'éléments différents dans la nature, les forces chimiques, elles, provoquent les combinaisons entre ces éléments et donnent naissance à l'infinie variété de choses qui existent dans l'univers. Les forces biochimiques produisent de longues chaînes de composés organiques, matériaux de construction des organismes vivants.

On ne sait pas très bien comment tout a commencé. Il est probable que toute la matière de l'univers était concentrée dans une "boule de feu primitive" à une température de l'ordre de plusieurs milliards de degrés. On suppose que cette boule de feu a explosé et a commencé son expansion il y a quelque 15 milliards d'années. Cette boule de feu était surtout composée d'hydrogène et, au début de son expansion, des réactions nucléaires auraient formé de l'hélium avec de l'hydrogène. Des éléments plus lourds auraient également été produits en plus petites quantités. (Même si la théorie de l'état stable de l'univers est exacte, les considérations qui suivent au sujet des modifications affectant les éléments n'en sont pas moins justes.)

Pendant son expansion, la boule de feu s'est refroidie et la matière s'est dispersée en fine poussière. Par endroits, cependant, la matière s'est trouvée concentrée, engendrant des galaxies d'étoiles. Ces dernières peuvent être appelées étoiles de la première génération, ce qui signifie qu'elles résultent de la condensation de matière de la première boule de feu qui était composée en grande partie d'hydrogène. Lorsque la masse d'hydrogène commence à se contracter (à se condenser) pour former une étoile, elle s'échauffe sous l'effet de la force de gravitation. La chaleur est bientôt suffisante pour déclencher des réactions thermo-nucléaires à l'intérieur de l'étoile. La pression créée par cette réaction arrête la contraction. L'étoile parvient à un état d'équilibre et puise son énergie principale dans la fusion des noyaux d'hydrogène pour former de l'hélium. Dans cet état, l'étoile peut exister pendant des millions ou des milliards d'années selon sa masse initiale. Après épuisement de l'hydrogène du noyau, aucune force ne peut plus contrebalancer la contraction gravitationnelle et le noyau recommence à se contracter. Il s'échauffe donc et crée une situation favorable à la fusion de trois noyaux d'hélium pour former un noyau de carbone. (Dans des conditions normales, il serait très difficile de réaliser la fusion de trois noyaux d'hélium. Mais, en raison d'une certaine correspondance des valeurs de paramètres nucléaires, cette réaction présente une section efficace importante — c'est la résonance — et sans cette résonance il n'y aurait guère de carbone dans la nature.) Cette réaction dégage suffisamment d'énergie pour éviter une nouvelle contraction. Lorsque l'hélium est, lui aussi, presque épuisé, le noyau se contracte à nouveau, déclenchant des réactions de fusion avec le carbone, et ainsi de suite. Ces réactions de fusion produiront des éléments comme l'oxygène, le néon, le magnésium, le silicium, etc. jusqu'à l'élément fer. Lorsque des neutrons apparaissent pendant cette période, ils entraînent la production d'un certain nombre de nucléides.

Les réactions de fusion thermonucléaires ne peuvent engendrer de nucléides que jusqu'au fer, car toute nouvelle addition de particules au fer nécessite un apport d'énergie (contrairement aux réactions précédentes qui dégageaient de l'énergie). Une fois que tous les matériaux du noyau sont transformés en fer, l'importance des réactions thermonucléaires diminue, le noyau recommence à se contracter, laissant une écorce de matière riche en fer et en éléments moins lourds. La contraction du noyau a une allure de cataclysme, car elle dégage une grande quantité d'énergie et un important flux de neutrons. De nombreuses réactions sont induites par les neutrons, elle produisent des éléments allant jusqu'à l'uranium et au-delà pendant un court laps de temps avant que l'étoile explose en projetant une grande quantité de matériaux dans l'espace interstellaire, enrichissant ainsi ce dernier en éléments lourds. Ces matériaux peuvent se condenser par la suite pour former une deuxième génération d'étoiles dont l'histoire se déroulera de manière identique. Leur explosion enrichira à nouveau la matière interstellaire qui formera la future génération d'étoiles. Notre Soleil est probablement une étoile de la troisième génération ou d'une génération ultérieure. Il contient, en dehors de l'hydrogène primordial (et de l'hélium), des éléments lourds produits par les générations d'étoiles précédentes.

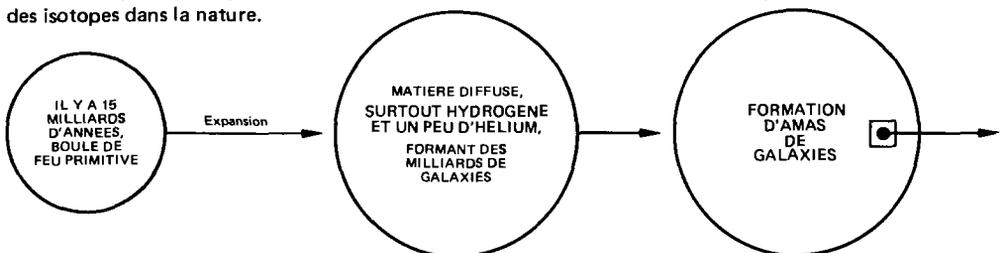
NUCLEOSYNTHESE

L'image simplifiée de la création des éléments dans une étoile se présentera de manière très variée selon la taille de l'étoile et son abondance initiale en éléments. Une étoile très lourde explosera en supernova, laissant derrière elle une étoile pleine de neutrons. Des étoiles de masse comparable à celle du soleil peuvent finir en naines blanches. Les vieilles étoiles formées lorsque les matériaux interstellaires étaient pauvres en éléments lourds auront des atmosphères composées essentiellement d'éléments légers. Les étoiles de générations ultérieures seront plus riches en éléments lourds, ce qui apparaît dans leurs caractéristiques spectrales. Le processus de création des divers éléments est appelé "nucléosynthèse". Il n'est pas inutile de souligner ici que les atomes dont nous sommes faits ont été, il y a longtemps, synthétisés à l'intérieur d'étoiles chaudes pour être rejetés un certain nombre de fois dans la froideur de l'espace interstellaire et former finalement le système solaire.

En général, nous pouvons classer les modifications des éléments en deux catégories: i) systèmes fermés, ii) systèmes ouverts. Dans la nature, tous les systèmes sont ouverts mais, dans un certain nombre de cas, ils peuvent se rapprocher de systèmes fermés. Dans les systèmes fermés, les modifications des éléments sont entièrement dues à des processus internes tandis que dans les systèmes ouverts les modifications peuvent être dues à des apports provenant de sources extérieures ou à un appauvrissement du système par perte d'éléments.

Lorsqu'on a analysé les sédiments des grands fonds marins, on a remarqué une curieuse répartition du nickel dans les sédiments. Les sédiments à faible vitesse de sédimentation contenaient plus de nickel que ceux dont la vitesse de sédimentation était élevée. Ce fait

Schéma des principaux phénomènes survenant dans l'univers qui modifient la proportion des éléments et des isotopes dans la nature.



n'a cessé d'intriguer jusqu'au jour où l'on a émis l'idée qu'une partie du nickel des sédiments pourrait avoir une origine extraterrestre.

La Terre reçoit constamment des matières interplanétaires (météoritiques) riches en nickel. Cette poussière tombe de manière à peu près uniforme sur la surface du globe. Si la vitesse de sédimentation d'une région (la plupart des sédiments étant d'origine terrestre) est faible, cette région retiendra une fraction relativement élevée de la composante extraterrestre à forte teneur en nickel et inversement. On a fait la même constatation sur un échantillon lunaire rapporté par les missions Apollo. On a constaté que le sol de la Lune contenait plus de nickel que les roches, l'excédent de teneur en nickel du sol lunaire s'expliquant à nouveau par un apport d'origine météoritique. La Terre reçoit chaque jour quelques centaines de tonnes de poussière cosmique.

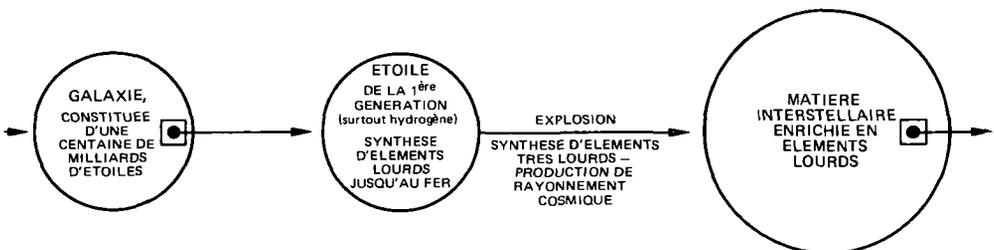
L'hélium est l'un des éléments dont l'abondance est la plus forte dans l'univers. En fait, il occupe la deuxième place après l'hydrogène. Mais sa présence sur la Terre n'en est pas moins très rare. La raison en est que, pour l'hélium, la Terre est un système ouvert. Celui-ci étant un gaz léger, la force de gravité de la Terre ne peut le retenir et il s'échappe donc dans l'espace. Tout l'hélium qui se trouvait à l'origine sur la surface de la Terre pendant la condensation a dû d'échapper il y a fort longtemps.

La petite quantité d'hélium que contient l'atmosphère de la Terre provient de la désintégration d'éléments radioactifs comme l'uranium et le thorium de la croûte terrestre. L'hélium de l'atmosphère est en état d'équilibre dynamique, celui qui s'échappe dans l'espace étant remplacé par la nouvelle désintégration du groupe de l'uranium et du thorium. De l'hydrogène aussi sort de l'atmosphère terrestre. Ceci explique le très faible pourcentage d'hydrogène libre qu'on y trouve. Toutefois, l'hydrogène est susceptible de réactions, et il se combine à l'oxygène pour former de l'eau. Comme les molécules d'eau sont lourdes, elles ne quittent pas la Terre. C'est grâce à sa réactivité chimique que l'hydrogène peut exister en quantités appréciables sur la Terre. Sur la Lune, des gaz encore plus lourds peuvent s'échapper étant donnée la moindre pesanteur. C'est ce qui explique l'absence d'atmosphère.

L'hydrogène et l'hélium, néanmoins, ne peuvent s'échapper de grosses planètes comme Jupiter et Saturne. La pesanteur étant très forte et les températures atmosphériques très basses, ces gaz sont piégés et conservent leur abondance première. Une analyse des gaz de l'atmosphère de ces planètes nous permettra d'élargir nos connaissances sur les conditions qui prévalaient au début du système solaire.

FORMATION DE NOYAUX

La gravitation joue aussi un rôle prépondérant dans la ségrégation des éléments des planètes. Lorsque les planètes se forment à partir de petits objets que rassemblent les forces de gravitation, leur composition devrait être assez uniforme (probablement analogue à celle d'une catégorie de météorites appelées chondrites carbonées, que l'on considère



comme les objets les plus anciens du système solaire). Toute la masse se serait agrégée à une température relativement basse. On suppose, du moins dans le cas de la Terre, que peu après le rassemblement, la désintégration d'éléments radioactifs comme ^{40}K , ^{233}U , ^{238}U et ^{233}Th a contribué au réchauffement du corps planétaire. Il en est résulté tout d'abord une fonte partielle de l'objet. Une fois la masse fondue, les métaux lourds comme le fer et le nickel se sont enfoncés tandis que les silicates, plus légers, restaient en surface. L'immersion du fer a entraîné un nouveau phénomène de fusion dû à l'énergie gravitationnelle supplémentaire résultant de l'enfoncement. Cette fusion a entraîné une nouvelle immersion encore plus profonde du fer et des autres métaux lourds. Il en est résulté une formation cataclysmique de noyaux, les éléments lourds étant concentrés au centre.

Dans le cas de la Terre, le noyau de fer-nickel a été formé par fusion suivant ce mécanisme, qui explique aussi son champ magnétique. Lorsqu'un corps planétaire n'est pas suffisamment chauffé, une telle séparation ne peut se produire. La Lune et la planète Mercure sont deux exemples d'astres dont la composition est à peu près uniforme.

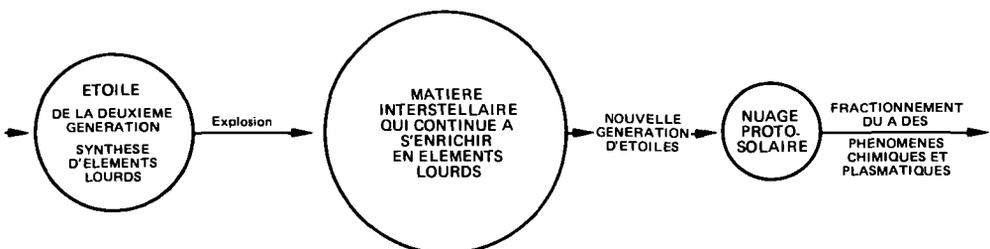
DESINTEGRATION RADIOACTIVE

La désintégration radioactive est une autre cause de modification possible des éléments d'un système. Nous avons dit que l'hélium de l'atmosphère provient de la désintégration de l'uranium et du thorium des roches superficielles. Un autre constituant important de l'atmosphère terrestre — l'argon — provient de même de la désintégration du potassium 40 des roches superficielles.

L'argon représente environ 1% de l'atmosphère terrestre et provient dans sa presque totalité de la désintégration radioactive. L'abondance de l'argon 40 dans l'univers est très faible. Dans le soleil, le rapport d'abondance $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ est d'environ 0,01 alors qu'il approche de 300 dans l'atmosphère terrestre. Cette augmentation considérable du rapport peut être attribuée à l'accumulation d'argon d'origine radioactive pendant des milliards d'années. En fait, l'analyse de roches sédimentaires a montré que la teneur en ^{40}Ar de l'atmosphère primitive était beaucoup plus faible. Dans l'atmosphère initiale de la Terre, l'abondance relative d'argon 40 devait être très faible, comme l'abondance actuelle dans le Soleil.

La plus grande partie de l'hélium et de l'argon provenant de la désintégration de noyaux radioactifs est piégée dans les roches et la quantité de ces gaz est proportionnelle à l'âge des roches. On peut donc en mesurant la quantité d'hélium et d'argon contenue dans des roches déterminer l'époque de leur formation. Les mesures pratiquées sur des roches terrestres ont montré que les plus anciennes datent de quelque 3,5 milliards d'années. Cette méthode de datation a aussi été appliquée aux roches lunaires et aux météorites. On a trouvé que l'âge des roches lunaires varie de 2 à 4 milliards d'années. Certaines météorites ont près de 4,6 milliards d'années, et sont donc aussi vieilles que la Terre et la Lune.

Les produits de désintégration du potassium 40, de l'uranium, etc. se sont accumulés pendant des milliards d'années étant donné la longue période de ces radionucléides. Il existe



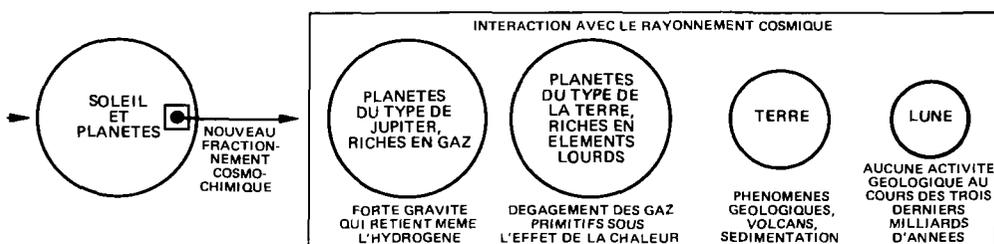
cependant d'autres radionucléides dont la vie moyenne est courte par rapport à l'âge du système solaire. Les produits de désintégration de corps radioactifs comme le plutonium 244 (période: 82 millions d'années), l'iode 129 (période: 17 millions d'années) ne peuvent s'accumuler dans une roche que si cette dernière est refroidie peu après la formation de ces nucléides lors du processus de nucléosynthèse décrit ci-dessus. En mesurant les gaz produits par cette désintégration (l'iode 129 se désintègre en xénon 129 et la fission du plutonium 244 produit un certain nombre d'isotopes du xénon), on peut déterminer l'époque de formation des objets du système solaire après la dernière phase de nucléosynthèse. On estime que les objets solides se sont condensés quelques dizaines de millions d'années après l'apparition d'un phénomène ayant entraîné la production de radionucléides comme le plutonium 244 et l'iode 129.

RAYONS COSMIQUES

Les rayons cosmiques sont des particules chargées d'énergie qui viennent de l'espace extra-terrestre. La majorité de ces particules sont des protons. Les électrons représentent environ un pour cent du flux. Les rayons cosmiques contiennent aussi de l'hélium et des noyaux lourds. En fait, ils renferment tous les éléments qui existent dans la nature, mais avec des abondances différentes. L'étude des abondances en isotopes et en éléments des noyaux des rayons cosmiques permettrait d'obtenir des renseignements sur les sources de ces derniers (supernovae, pulsars, etc.) ainsi que sur l'espace interstellaire. Les rayons cosmiques réagissent avec la matière interstellaire et subissent des modifications caractéristiques qu'il est possible d'identifier. Les sources de rayons cosmiques, par exemple, présentent en général un rapport $^4\text{He}/^3\text{He}$ élevé. Lorsque les noyaux d'hélium 4 réagissent avec l'hydrogène interstellaire, une partie est transformée en hélium 3 (et également en hélium 2). Le rapport $^3\text{He}/^4\text{He}$ augmentera donc en fonction de la quantité de matière traversée. La mesure de ce rapport a permis d'estimer que les noyaux des rayons cosmiques ont rencontré une "quantité de matière" égale à environ 4 g/cm^2 sur leur trajectoire entre la source et la Terre.

Nous avons récemment étudié les rayons cosmiques de très faible énergie au moyen des détecteurs du laboratoire placé sur orbite Skylab. Les données recueillies ont montré des variations inhabituelles de la composition des noyaux lourds par rapport aux rayons cosmiques de haute énergie. Ces résultats laissent supposer que la composante à basse énergie a une source tout à fait différente.

Pendant la traversée de l'espace interplanétaire les particules des rayons cosmiques réagissent avec la poussière interplanétaire, les météorites, la Lune et l'atmosphère terrestre. Ces réactions provoquent diverses transmutations qui se traduisent par la production de radionucléides dont les vies moyennes varient entre une seconde et des milliards d'années ainsi que de nucléides stables. La mesure de ces activités dans les météorites a révélé une constance à peu près totale des rayons cosmiques pendant les dernières centaines de millions d'années et probablement pendant des milliards d'années.



Les météorites en bombardant la surface de la Lune y creusent des cratères et éparpillent un certain nombre de roches. Lorsque ces roches sont profondément enfouies, les rayons cosmiques ne réagissent pas avec elles. Mais, lorsqu'elles sont exposées en surface aux rayons cosmiques, leur composition isotopique subit des modifications caractéristiques sous l'effet des interactions nucléaires. La quantité d'hélium-3, par exemple, augmente en fonction de la durée d'exposition. La mesure de ces variations (quantité d'hélium-3 ou d'isotopes du néon, par exemple) permet de déterminer l'époque d'exposition de ces roches. On a ainsi calculé que l'exposition de la surface des roches lunaires date de quelques millions d'années. La transformation de la surface sous l'effet des impacts de météorites et les processus de sédimentation qui ont suivi dans la régolithe lunaire permettent de conclure que la durée d'exposition n'a pas dépassé quelques millions d'années.

APPLICATIONS GEOPHYSIQUES

L'interaction des rayons cosmiques et de l'atmosphère terrestre produit des radionucléides dont l'analyse nous a permis de comprendre divers phénomènes observés dans la circulation atmosphérique, ou étudiés en océanographie, en hydrologie, etc. Le carbone 14, isotope produit par l'interaction de neutrons et de l'azote atmosphérique, est mis à profit non seulement en hydrologie et en océanographie, mais aussi en archéologie pour faire des datations. En géophysique, les produits radioactifs qui apparaissent surtout dans les couches supérieures de l'atmosphère jouent le rôle de marqueurs. ^7Be , ^{22}Na et ^{32}Pa permettent d'étudier la circulation dans l'atmosphère. Les nucléides de période très courte donnent la possibilité d'étudier les systèmes fermés. On analyse ces produits radioactifs en les prélevant dans l'eau de pluie ou dans les filtres à air. Le tritium, isotope de l'hydrogène, permet de déterminer l'âge des eaux souterraines.

Le radon 222 est un gaz radioactif de période courte, environ quatre jours, qui est libéré au cours de la décroissance radioactive de l'uranium 238. Il est rejeté de la croûte terrestre dans l'atmosphère par diffusion lente. La quantité de radon contenue dans l'atmosphère reste constante, car la décroissance radioactive est compensée par le dégagement de radon provenant de la croûte terrestre. Le sol contenant davantage d'uranium que l'eau, les quantités de radon contenues dans l'atmosphère située au-dessus des terres sont bien supérieures à celles qui se trouvent au-dessus des masses liquides. Une étude des quantités de radon (exceptionnellement élevées contenues dans l'air apporté par la mousson au-dessus de Bombay) a conduit à penser que ces masses d'air devaient provenir des côtes africaines et arabiques et non pas directement de l'océan Indien, comme on l'avait cru jusqu'alors. Cette hypothèse est cependant contestée. Une étude approfondie de la répartition du radon permettra de comprendre beaucoup mieux la façon dont se déplace la mousson.

Il est également reconnu que la quantité de radon contenue dans l'atmosphère s'accroît avant le début des tremblements de terre. En effet, les déformations qui apparaissent dans les roches avant les tremblements de terre accélèrent la diffusion du radon. Par conséquent, l'analyse des quantités de radon contenues dans les masses d'air qui se trouvent au-dessus de régions où de graves tremblements de terre sont à craindre permettra de prévoir ces derniers.

ISOTOPES ARTIFICIELS

Les radionucléides qui sont présents dans l'atmosphère ne sont pas tous d'origine naturelle ou créés par des rayons cosmiques. Ils peuvent aussi être le résultat des explosions nucléaires qui ont lieu dans l'atmosphère. C'est le cas de bon nombre de radioisotopes tels que le strontium 90, le tritium et le carbone 14. L'observation des variations du carbone 14 dans l'atmosphère pendant une certaine période a montré qu'il fallait quelques années pour que l'air de la stratosphère (dans lequel la radioactivité est dégagée) se mélange à la troposphère.

Jusqu'à l'âge de la pierre, toutes les modifications des éléments étaient essentiellement dues au travail de la nature. Ce n'est qu'avec l'évolution de la civilisation que l'homme s'est mis à modifier sensiblement la répartition naturelle des éléments. Il a appris à utiliser les minerais, à concentrer les métaux et à obtenir des produits industriels. Jusqu'à la découverte de la physique nucléaire, ces transformations ne relevaient que du domaine de la chimie, mais les techniques nucléaires modernes, mettant en jeu les accélérateurs et les réacteurs nucléaires, ont accru les possibilités de l'être humain en lui permettant de transmuter les éléments. La production d'énergie dans les réacteurs nucléaires s'accompagne d'une modification constante de la composition en éléments et isotopes. L'homme crée ainsi de nombreux isotopes artificiels qui, jusqu'à présent, n'avaient jamais existé sur la Terre en quantités aussi grandes. Avec les bombes thermonucléaires, l'homme a provoqué des phénomènes qu'on n'avait jusqu'à présent décelés qu'à l'intérieur des étoiles.

REACTEUR NUCLEAIRE NATUREL

Nombreux sont probablement ceux qui croient que les réacteurs nucléaires sont une invention humaine que la nature ne peut pas reproduire. On a cependant trouvé certains minerais d'uranium où le rapport $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ est inférieur à 1/137, qui est le rapport commun à la plupart des minerais. Ceci semble montrer que l'uranium 235 a été éliminé sélectivement du gisement, ce qui peut se produire à l'occasion d'une fission induite dans un réacteur nucléaire qui utiliserait l'uranium naturel comme combustible. L'uranium 235 est sujet à fission alors que l'uranium 238 est stable en présence de neutrons thermiques. Le rapport $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ décroît avec le temps. Mais comment peut-il décroître à l'intérieur du minerai lui-même? On ne peut s'expliquer cet état de choses qu'en supposant qu'autrefois la concentration d'uranium sur la Terre a probablement été suffisante pour alimenter une réaction en chaîne. L'eau souterraine pourrait alors avoir agi comme modérateur et un réacteur naturel aurait ainsi été créé. Certains spécialistes avancent aussi que ces réacteurs naturels, ou parfois des explosions nucléaires naturelles, pourraient avoir autrefois produit une partie de l'énergie qui a provoqué le déplacement des masses continentales, autrement dit la dérive des continents.

MODIFICATIONS DUES A DES CAUSES BIOLOGIQUES

Les processus biologiques contribuent aussi à faire varier la proportion des éléments dans la nature. Les plantes absorbent le gaz carbonique de l'atmosphère et dégagent de l'oxygène par photosynthèse. Leurs processus biochimiques complexes leur permettent aussi de concentrer de nombreux éléments du sol. Certains organismes marins concentrent le calcium qui se trouve dans l'eau de mer pour constituer le calcaire de leur coquille. Certains autres organismes concentrent le silicium.

On a relevé une correspondance entre les éléments traces contenus dans le sang humain et ceux qu'on trouve dans les roches. On sait en outre que le système pileux concentre de nombreux éléments traces présents dans le sang. Les éléments traces présents dans le système pileux d'une personne donnée dépendent donc des habitudes alimentaires de celle-ci, de la région et du milieu où elle a vécu, de ses maladies, etc., car ces facteurs influent sur la concentration des éléments traces dans le sang. L'étude de la répartition de ces éléments dans le système pileux peut donc être utilisée dans des domaines aussi vastes que l'archéologie, la géophysique, la médecine et la recherche médico-légale. On a découvert récemment que les cellules cancéreuses concentrent les éléments traces en plus grande quantité que les cellules normales. On peut même, en analysant des éléments tels que le cuivre contenus dans les cellules de l'organisme, dépister des cancers dès leur début.

ANTIMATIÈRE

Nous avons vu que la proportion des éléments varie dans la matière normale. Il est probable que, dans certaines parties de l'univers, il existe des objets faits d'antimatière. Il est difficile, et même probablement impossible, de distinguer ces objets au moyen de la lumière qu'ils émettent. Cependant, l'antimatière est détruite par interaction avec la matière normale, et un certain nombre de particules élémentaires apparaissent. On a recherché des particules antinucléaires dans les rayons cosmiques mais on n'a encore aucune preuve de leur présence (on a cependant trouvé dans des rayons cosmiques des positons, qui sont les antiparticules des électrons, Ces positons sont peut-être le résultat d'interactions secondaires qui se produisent lorsque les rayons cosmiques traversent l'espace interstellaire).

Un morceau d'antimatière, en entrant en réaction avec l'atmosphère terrestre, pourrait entraîner des modifications suffisantes de la proportion des éléments pour qu'elles puissent être observées. Lorsque l'antimatière entre en réaction avec les noyaux de l'atmosphère, elle produit une grande quantité de mésons K qui, lors d'une nouvelle interaction, produisent des neutrons. Ces neutrons peuvent à leur tour produire du carbone 14 à partir de l'azote de l'atmosphère. Donc, après un choc récent d'antimatière en un point donné, la quantité de carbone 14 présente en ce point est supérieure à la normale. Les effets de la météorite tombée en 1908 dans la Tunguska, en URSS, ont été attribués à l'antimatière. Cependant, l'analyse radioactive du carbone 14 présent dans cette région n'a pas confirmé cette hypothèse. Actuellement, l'existence d'antimatière en quantité suffisante pour constituer des étoiles et des galaxies n'a pas encore été prouvée et demeure une simple supposition. Les observations astrophysiques pourront peut-être un jour apporter une réponse à ces passionnantes spéculations.

QUELQUES CAUSES DE MODIFICATIONS AFFECTANT LES ELEMENTS ET ISOTOPES

PHENOMENES NATURELS

Physiques: Gravitation, électromagnétisme, réactions nucléaires et décroissance radioactive, érosion

Chimiques: Géochimie, cosmochimie, biologie, géobotanique

CAUSES ARTIFICIELLES

Coopérations industrielles, par exemple extraction des minerais et fabrication de produits chimiques

Pollution industrielle

Combustion de combustibles fossiles

Réacteurs et bombes nucléaires