

# Radioactivité et sciences de la terre: comprendre le milieu naturel

*La radioactivité terrestre facilite l'étude de processus géologiques  
et des changements du climat mondial*

**P**ratiquement toutes les substances naturelles contiennent plus ou moins de radionucléides. Cette radioactivité naturelle, découverte il y a un siècle par le physicien français Henri Becquerel, trouve aujourd'hui une application pratique dans maints domaines de la science et de l'industrie.

L'étude du transfert des radionucléides naturels selon leurs propriétés physiques et chimiques permet de retracer l'évolution de la croûte et du manteau terrestres, d'élucider le cycle hydrologique ainsi que certains aspects de la composition de l'atmosphère. La radioactivité des roches, des minéraux, de l'eau et de la matière organique est largement utilisée pour dater les matières d'intérêt géologique et archéologique, ainsi que les eaux souterraines.

On pense que l'énergie libérée par la décroissance radioactive est une des principales sources de la chaleur intérieure de la Terre. La force motrice des mouvements tectoniques de la lithosphère, l'orogénie et les phénomènes volcaniques résultent probablement de la présence de radionucléides qui, même sur le plan local, serait à l'origine des flux thermiques importants constatés dans les roches de la croûte terrestre. Ces derniers provoquent des courants de convection dans les eaux souterraines qui peuvent aboutir à la formation de systèmes hydrothermiques et à une minéralisation associée.

La découverte, puis l'exploitation des réactions de fission et de fusion sont venues ajouter de nouveaux éléments aux matières radioactives déjà présentes dans l'environnement. Nombre de radionucléides ont été introduits dans l'écosystème planétaire, notamment par les essais nucléaires dans l'atmosphère et par les rejets de l'industrie nucléaire. Une étude de leur transport à travers les différents compartiments de l'écosystème mondial permet de mieux comprendre la dynamique de l'atmosphère et du cycle hydrologique (voir l'encadré).

M. Rozanski est membre de la Section d'hydrologie isotopique de l'AIEA, Division des sciences physiques et chimiques; M. Froehlich est chef de cette section.

## L'horloge naturelle de la Terre

L'application peut-être la plus caractéristique et la plus réussie de la radioactivité aux sciences de la terre est son emploi comme «horloge» naturelle pour établir la succession des divers processus qui se déroulent sur la planète. La remarquable souplesse de cette méthode permet de l'employer dans plus d'une quinzaine d'ordres de grandeur pour quantifier des phénomènes durant de quelques minutes à plusieurs milliards d'années. Pour dater avec précision un matériel géologique ou biologique, deux conditions essentielles sont à remplir: 1) la source et le récepteur possible du radionucléide utilisé doivent être soigneusement déterminés; 2) l'état physique passé du système à dater doit être connu ou évalué (système ouvert ou fermé).

Divers radionucléides sont utilisés à cette fin en géologie et en archéologie: les produits de la nucléosynthèse stellaire (radionucléides primordiaux), les descendants des chaînes de désintégration naturelle, les produits des réactions nucléaires naturelles dans l'atmosphère (d'origine cosmique) et la lithosphère (produits *in situ*), et ceux des réactions nucléaires artificielles (d'origine anthropique).

Voyons comment fonctionne cette horloge. Son principe: la décroissance radioactive est indépendante des conditions physiques et chimiques et des changements qui interviennent dans l'environnement; le taux de décroissance d'un radionucléide est fonction de sa période, c'est-à-dire le temps dont un nombre déterminé d'atomes de l'élément a besoin pour diminuer de moitié. Pour obtenir une datation précise, il faut employer un radionucléide dont la période est du même ordre que l'âge de la matière à dater. Fort heureusement, les périodes des radionucléides naturels varient de moins d'une seconde à plus de  $10^{10}$  années (voir le tableau, page suivante). Par conséquent, la plage de datation est extrêmement étendue et englobe l'âge de la Terre et du système solaire. Certaines méthodes de datation exploitent le rapport entre le radionucléide et son

par Kazimierz  
Rozanski et  
Klaus Froehlich

## Principales applications aux sciences de la terre des radionucléides naturels et artificiels

### Etude de l'atmosphère

- Processus de dispersion, de transport et de mélange, à l'échelle locale, régionale et mondiale (tritium, krypton 85, radon 222, carbone 14)
- Transport de la vapeur d'eau (tritium)
- Echange stratosphère-troposphère (tritium, carbone 14, krypton 85, béryllium 7, béryllium 10)
- Sources et récepteurs de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> (tritium, carbone 14)
- Dépôt d'origine atmosphérique (chlore 36, béryllium 7, béryllium 10, strontium 90, césium 137)

### Etude de l'hydrosphère

#### Hydrosphère continentale

- Alimentation des eaux souterraines (tritium, chlore 36)
- Etudes de la dispersion dans les eaux de surface (tritium)
- Etudes de l'aération (krypton 85)
- Interaction eaux de surface-eaux souterraines (tritium, radon 222, carbone 14)
- Datation des eaux souterraines (tritium, carbone 14, krypton 85, argon 39, chlore 36, krypton 81)
- Interaction roches-eau (uranium 238, uranium 234, radium 226, radium 228)
- Taux de sédimentation dans les lacs naturels et artificiels (césium 137, plomb 210)
- Evacuation des déchets radioactifs (chlore 36, iode 129)

#### Océans

- Processus de circulation et de mélange (tritium, carbone 14, krypton 85)
- Age des masses d'eau (tritium, carbone 14, argon 39, krypton 85)
- Transfert aux océans du CO<sub>2</sub> d'origine anthropique (carbone 14)
- Datation des sédiments océaniques (carbone 14, potassium 40)
- Variations du niveau des mers dans le passé (carbone 14, uranium 234, thorium 230)

### Etude de la lithosphère

- Datation des roches et des minéraux (potassium 40, argon 39, rubidium 87, lutécium 176, hafnium 174, samarium 147, néodyme 143, rhénium 187, radionucléides de la famille de l'uranium et du thorium)
- Datation des dépôts de carbonates (carbone 14, uranium 234, thorium 230)
- Datation des sédiments lacustres (césium 137, plomb 210, carbone 14, uranium 234, thorium 230)
- Datation de l'exposition en surface (béryllium 10, carbone 14, aluminium 26, chlore 36)
- Erosion des sols (césium 137, plomb 210, béryllium 10)
- Prospection minière (radionucléides de la famille de l'uranium et du thorium)
- Sismologie (radon 222)
- Paléosismicité et éruptions volcaniques (chlore 36, aluminium 26, béryllium 10)

produit de désintégration qui, en pareil cas, est généralement un nucléide stable.

Jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, les estimations de l'âge de la Terre variaient considérablement, de quelques dizaines de millions à plusieurs dizaines de milliards d'années. La question fut tranchée en 1929, lorsque Rutherford utilisa la radioactivité

## Radionucléides naturels et d'origine anthropique fréquemment utilisés en sciences de la terre

Nucléide	Période (années)	Origine*
Tritium	12,43	N + A
Béryllium 7	$9,7 \times 10^{-2}$	N
Béryllium 10	$1,6 \times 10^6$	N
Carbone 14	5730	N + A
Silicium 32	140	N
Chlore 36	$3,01 \times 10^5$	N + A
Argon 39	269	N
Krypton 85	10,76	A
Krypton 81	$2,1 \times 10^5$	N
Iode 129	$1,57 \times 10^7$	N + A
Potassium 40	$1,31 \times 10^9$	N
Rubidium 87	$4,88 \times 10^{10}$	N
Césium 137	30,17	A

### Radionucléides de la famille de l'uranium et du thorium

Uranium 238	$4,47 \times 10^9$	N
Uranium 235	$7,13 \times 10^8$	N
Uranium 234	$2,48 \times 10^5$	N
Protactinium 231	$3,43 \times 10^4$	N
Thorium 230	$7,52 \times 10^4$	N
Radium 226	1602	N
Radium 228	5,75	N
Radon 222	$1,05 \times 10^{-2}$	N
Radon 220	$1,76 \times 10^{-6}$	N
Plomb 210	22,3	N

\* N — naturelle (désintégration des radionucléides primordiaux produits par la nucléosynthèse stellaire, interactions des rayons cosmiques avec l'atmosphère ou la croûte terrestre); A — anthropique (explosions nucléaires dans l'atmosphère et sous terre, industrie nucléaire, industrie horlogère, hôpitaux, etc.); N + A — apport important de sources naturelles et anthropiques.

récemment découverte pour mesurer l'âge des roches qu'il fixa à plusieurs milliards d'années par la méthode U-He. Le premier calcul précis de l'âge de la Terre et des météorites a été fait au début des années 50 en se fondant sur les isotopes stables du plomb, derniers produits de filiation de plusieurs familles radioactives. L'âge de la Terre a été fixé à 4,55 milliards d'années, chiffre généralement accepté aujourd'hui encore pour l'ensemble du système solaire.

### Détection de la radioactivité naturelle

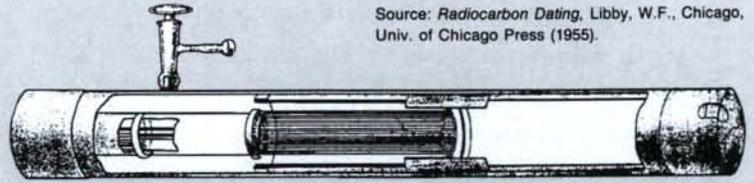
Les radionucléides naturels ont été découverts grâce aux rayonnements ionisants qu'ils émettent en cours de leur désintégration. La technique de «comptage» de ces rayonnements a été progressive-

### Datation au radiocarbone

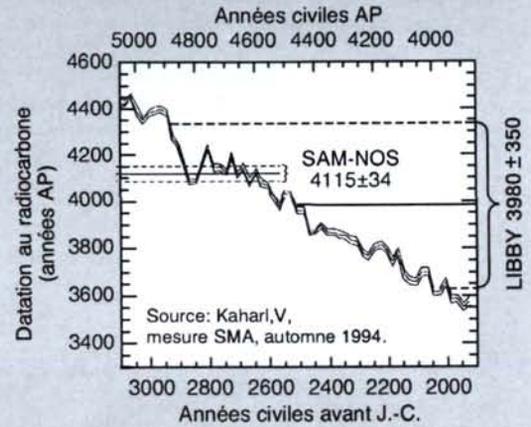
Compteur multifilaire à puits utilisé par Willard Libby pour doser le carbone 14 dans des objets archéologiques (à droite). Libby a reçu le prix Nobel en 1960 pour ses travaux sur la datation au radiocarbone. Notre photo montre un ensemble moderne de spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) tandem, spécialement conçu pour le dosage du radiocarbone et disponible sur le marché. Le premier échantillon daté par Libby en 1948 était un morceau de bois d'acacia prélevé sur un meuble trouvé dans le tombeau du pharaon Djoser, à Saqqara (Egypte). Pour faire son analyse, Libby avait besoin de 20 grammes environ de ce précieux objet archéologique. Se fondant sur des événements cosmiques, des hiéroglyphes et autres données historiques, divers égyptologues s'accordaient pour dater le règne de Djoser vers 2600 avant J.-C. Comme le montre le graphique, Libby a daté son échantillon à 2030 plus ou moins 350 ans avant notre ère, soit 3980 plus ou moins 350 ans avant le temps présent (AP). En 1992, ce même échantillon a été le premier à être daté à l'aide du nouveau spectromètre de masse à accélérateur de l'installation National Ocean Sciences (NOS), Institut océanographique de Woods Hole, Massachusetts (Etats-Unis). Dans ce cas, environ 10 milligrammes seulement du bois d'acacia ont suffi pour l'opération. La datation SMA au radiocarbone du meuble du pharaon a donné 4115 plus ou moins 34 ans AP, c'est-à-dire dans les limites de l'erreur systématique par rapport à la première datation de Libby.

Pour convertir les années radiocarbone en années civiles, il faut opérer des corrections pour tenir compte des variations passées de la teneur en radiocarbone du dioxyde de carbone atmosphérique. Ces corrections se font à partir de la mesure des concentrations de radiocarbone dans une série de cernes d'arbres par des techniques dendrochronologiques. La datation SMA de l'échantillon d'après les cernes donne deux résultats avec un degré de confiance de 95 %: entre 2877 et 2800, et 2780 et 2580 avant J.-C. Ce résultat correspond aux estimations archéologiques. Toutefois, une variation très nette de la courbe d'étalonnage dans la fourchette du règne de Djoser exclut une estimation corrigée très précise de l'âge de l'échantillon.

(Photo: P.M. Grootes, Université Christian Albrechts, Kiel, Allemagne)



Source: *Radiocarbon Dating*, Libby, W.F., Chicago, Univ. of Chicago Press (1955).



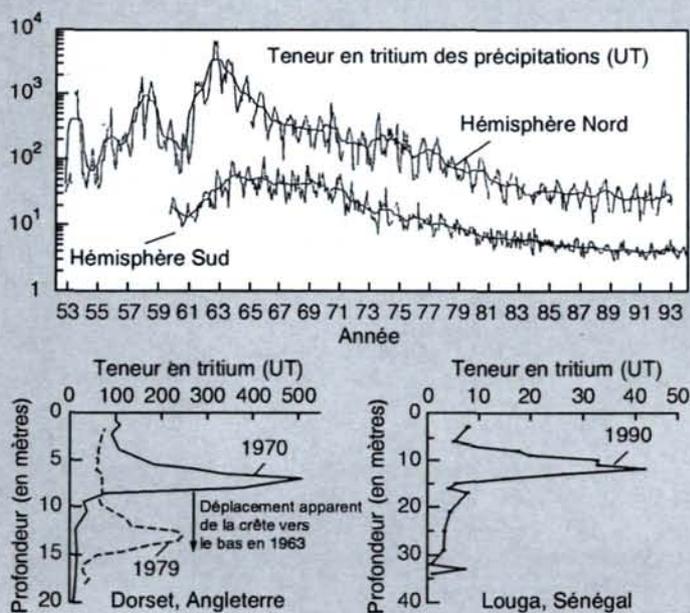
ment mise au point depuis la découverte de la radioactivité naturelle, il y a un siècle. Le comptage de désintégration s'est imposé comme méthode et des matières très variées (gaz, liquides, semi-conducteurs, etc.) sont utilisées pour détecter les rayonnements ionisants émis par divers radionucléides. Comme les niveaux d'activité des radionucléides naturels sont généralement très bas, la sensibilité des détecteurs est souvent améliorée par des techniques très perfectionnées de traitement du signal et de réduction du bruit de fond. Pour les radio-isotopes de courte période, inférieure à un an, les techniques de comptage modernes sont suffi-

santes. Les radio-isotopes primordiaux de période supérieure à quelque  $10^9$  années sont relativement abondants dans la nature (puisque'ils ne se sont pas désintégrés complètement depuis la naissance du système solaire). Le comptage est alors remplacé la plupart du temps par une spectrométrie de masse classique portant sur l'accumulation des produits stables de désintégration. Les radio-isotopes de période intermédiaire, entre  $10^3$  et  $10^8$  années, sont difficiles à mesurer par comptage car une petite fraction seulement des atomes se désintègre dans un délai raisonnable. Par exemple, lorsqu'on mesure la concentration de carbone 14 dans un échantillon

### Concentrations de tritium résultant des essais nucléaires dans l'atmosphère

Le premier graphique montre l'augmentation de la teneur en tritium des précipitations à la suite des essais nucléaires dans l'atmosphère. Les concentrations sont relevées à l'échelle planétaire par le réseau mondial AIEA/OMM de mesure des isotopes dans les précipitations. Les résultats de deux séries de mesures de longue durée sont présentés ici pour les deux hémisphères.

Les deux graphiques suivants montrent la pénétration de la vague de tritium due aux essais nucléaires dans la zone non saturée d'une formation aquifère en zone tempérée (Dorset, Angleterre), et semi-aride (Louga, Sénégal). Dans le cas de Louga, où les mesures ont été faites dans le cadre d'un projet de coopération technique de l'AIEA, le taux moyen d'alimentation de l'aquifère au cours des trois dernières décennies a été estimé à environ 22 mm par an. Un taux aussi faible est très difficile à mesurer par les méthodes hydrologiques classiques.



organique à l'aide d'un compteur proportionnel à gaz ou d'un compteur à scintillateur liquide, en moyenne un seul atome sur  $10^6$  atomes de carbone 14 présents dans l'échantillon se désintègre et déclenche le signal. Il faut donc en pareil cas utiliser des échantillons relativement volumineux.

Les accélérateurs de particules du genre de ceux destinés à la recherche en physique nucléaire servent aussi, associés à des analyseurs de masse magnétiques et électrostatiques, à mesurer les très faibles concentrations de radio-isotopes. Les travaux dans ce domaine ont commencé vers la fin des années 70. Plusieurs radio-isotopes de longue période qu'il était extrêmement difficile de mesurer par comptage (béryllium 10, carbone 14, aluminium 26, chlore 36, calcium 41, iode 129) sont désormais couramment mesurés dans de petits échantillons naturels de l'ordre de  $10^5$  atomes ayant une teneur isotopique de  $10^{-12}$  à  $10^{-15}$ . Cette technique de spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) a permis de réduire la taille des échantillons de plusieurs ordres de gran-

deur. La quantité de carbone nécessaire à la datation au radiocarbone par comptage est de quelques grammes, réduits à quelques dizaines de microgrammes grâce à la SMA. De même, la période de comptage est très sensiblement raccourcie. Depuis une dizaine d'années, la SMA est appliquée à la recherche, surtout en sciences de la terre (climatologie, cosmochimie, géochronologie, géomorphologie, hydrologie, glaciologie, prospection minérale et sédimentologie), en anthropologie et en archéologie (datation au radiocarbone) (voir l'encadré, page précédente), et, depuis quelques années, en science des matériaux et en biologie.

### Datation des eaux souterraines

Les isotopes radio-actifs ont trouvé de nombreuses applications en hydrologie. Le tritium et le carbone 14 sont largement utilisés comme «dateurs». Les essais thermonucléaires dans l'atmosphère pratiqués dans les années 50 et au début des années 60 ont libéré d'énormes quantités de tritium artificiel dans l'hydrosphère. L'observation de cette bouffée transitoire de tritium dans le cycle de l'eau a mené à maintes études hydrologiques à l'échelle mondiale, régionale et locale. Ce «tritium des bombes» est devenu un précieux indicateur des eaux jeunes dans les systèmes souterrains et un traceur utile pour la mesure du taux d'alimentation des formations aquifères, en particulier dans les régions semi-arides et arides (voir les graphiques ci-contre).

Malgré la complexité de la géochimie du carbone dans les eaux souterraines, on se sert désormais couramment du carbone 14 naturel et d'origine anthropique pour évaluer l'âge des eaux souterraines entre quelques milliers et quelques dizaines de milliers d'années. Par exemple, le radiocarbone a permis pour la première fois de déterminer l'âge des vastes réserves d'eaux souterraines du Sahara (voir le graphique, page suivante).

La SMA a également rendu possible l'utilisation de quelques nouveaux isotopes en hydrologie, tels le chlore 36 et l'iode 129. Grâce au chlore 36, les eaux souterraines de volumineux bassins sédimentaires, tel le Grand bassin artésien d'Australie, ont pu être datées jusqu'au million d'années. La mesure de l'iode 129 dans les formations aquifères profondes associées aux gisements de pétrole sert à déterminer l'origine et l'âge de ces eaux.

### Quantification de l'érosion et de la sédimentation

Les échelles de temps de l'érosion sont très variables: le phénomène peut être relativement rapide dans le cas des sols, et souvent provoqué par l'activité humaine, ou relativement lent dans le cas des roches exposées aux intempéries. L'érosion des sols

pose un grave problème dans plusieurs parties du monde du fait de son impact sur le développement agricole durable.

En principe, plusieurs radio-isotopes, tant naturels qu'artificiels, servent à évaluer le taux d'érosion des sols, selon l'échelle de temps considérée. Le césium 137 et le plomb 210, notamment, sont de loin les plus couramment utilisés.

L'AIEA a abordé ce problème avec son programme de recherche coordonnée (PRC) sur l'évaluation de l'érosion et de la sédimentation à l'aide des radionucléides de l'environnement et son application aux mesures de conservation des sols, auquel collaborent des établissements de recherche de dix Etats Membres. Le PRC vise à perfectionner les méthodes isotopiques servant à évaluer les taux d'érosion des sols dans diverses conditions climatiques et à mesurer le débit solide des bassins hydrographiques ainsi que l'envasement des lacs naturels et artificiels.

Pendant la dernière décennie ont été mises au point, grâce à la SMA, de nouvelles méthodes de datation des reliefs terrestres, lesquelles se fondent sur l'accumulation des radionucléides d'origine cosmique (béryllium 10, carbone 14, aluminium 26, chlore 36 et calcium 41) dans les roches exposées en surface. Ces derniers sont produits *in situ* par interaction des rayons cosmiques avec les atomes de minéraux — spallation sous l'effet de hautes énergies, capture neutronique et désintégration nucléaire induite par les muons. Leur datation se fait entre quelques milliers et plusieurs millions d'années.

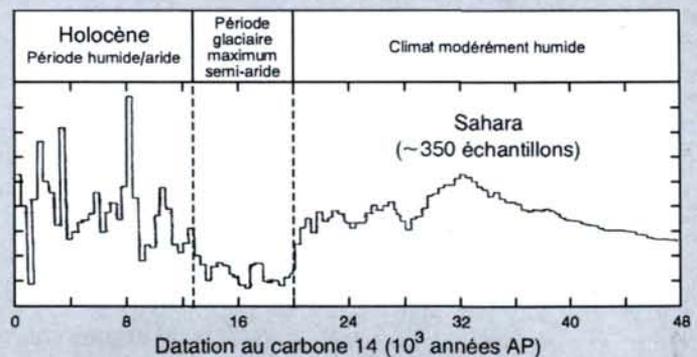
### Variations climatiques du passé

Des radio-isotopes très variés ont été utilisés, selon l'échelle de temps des phénomènes étudiés et la nature des échantillons à dater, pour reconstituer chronologiquement les modifications du climat et de l'environnement dans le passé. Au cours des 40 dernières années, on a procédé à des centaines de milliers de dosages du radiocarbone présent dans des matières sédimentaires océaniques et lacustres, des cernes d'arbres, des eaux océaniques, des eaux souterraines et dans le dioxyde de carbone atmosphérique.

Par ailleurs, la datation à l'uranium-thorium est de plus en plus courante, notamment sous sa forme moderne qui permet de détecter les isotopes de l'uranium et du thorium dans l'échantillon par spectrométrie de masse à thermo-ionisation (SMTI) et non plus par comptage du rayonnement de désintégration et de dater des matières géologiques (carbonates, sédiments) vieilles de quelque 350 000 ans. Pour les reconstitutions à haute résolution des changements climatiques vers la fin de la dernière période glaciaire, il importe tout spécialement de déterminer les teneurs passées de l'atmosphère en carbone 14, lesquelles sont soumises aux variations du taux

### Distribution des fréquences de l'âge radiocarbone d'échantillons d'eaux souterraines prélevés au Sahara

L'existence de vastes réserves d'eaux souterraines gisant en profondeur sous le plus grand désert du monde n'est connue que depuis le début de ce siècle, et ce n'est qu'après la mise au point de la datation au carbone que l'on a pu évaluer l'âge de ces eaux. D'après le graphique (fondé sur l'analyse de 350 échantillons prélevés en Algérie, en Egypte, en Jamahiriya arabe libyenne et dans le Sud saharien), il est évident que les aquifères d'Afrique septentrionale ont été alimentés surtout pendant les périodes pluvieuses de l'Holocène et pendant les intervalles de la dernière glaciation. Le minimum qu'indique nettement la courbe entre 12 000 et 20 000 ans AP rend compte de la période d'aridité maximale. La connaissance de l'âge des eaux souterraines a un effet direct sur l'exploitation de ces ressources: l'absence de tritium et les faibles concentrations de radiocarbone donnent à penser que l'aquifère en question n'est pas alimenté actuellement.



Source: Sonntag et coll., *Radiocarbon*, 22 (1987), 871-879

de production de ce radioélément et aux modifications de la circulation dans les océans.

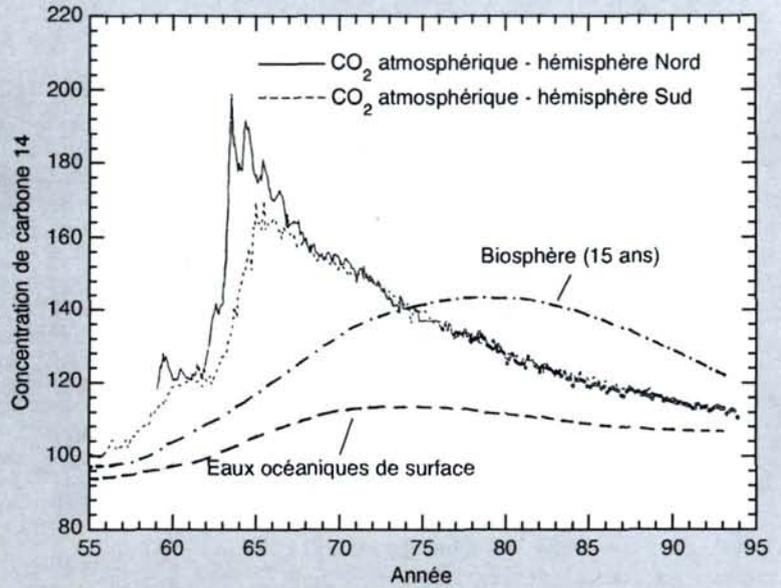
### Recherche du «récepteur manquant»

Les essais nucléaires dans l'atmosphère ont donné une impulsion caractéristique aux concentrations de carbone 14 dans le dioxyde de carbone atmosphérique (voir le graphique, page suivante). Cette poussée sert d'indicateur dans le cycle mondial du carbone, tout comme le tritium des bombes dans le cycle mondial de l'eau. La réserve atmosphérique du carbone 14 des essais s'épuise progressivement, et l'excédent d'activité dû à cet isotope se retrouve dans la biosphère et dans les carbonates océaniques. En observant l'évolution dans le temps du carbone 14 dans les réservoirs correspondants (atmosphère, biosphère, océans), on peut en savoir davantage sur les taux de transfert du carbone entre ces réservoirs, notamment entre l'atmosphère et les océans.

Il est absolument indispensable de connaître quantitativement le cycle mondial du carbone, car le dioxyde de carbone est le gaz à effet de serre le plus important et contribue pour environ 50 % à l'échauffement supposé de la Terre.

**Evolution de la concentration de carbone 14 dans le CO<sub>2</sub> atmosphérique à la suite des essais nucléaires**

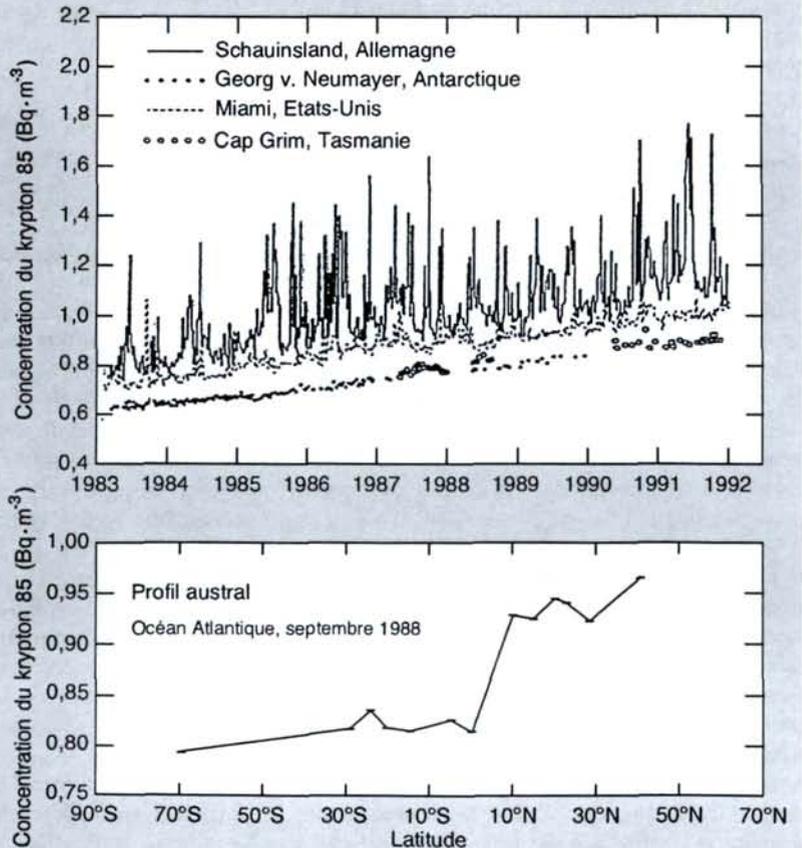
L'observation à long terme des concentrations de carbone 14 est faite par plusieurs stations réparties dans les deux hémisphères (Schauinsland, Allemagne; Station Neumayer, Antarctique; Izaña, Ténériffe, Espagne; Cap Grim, Tasmanie; Merida, Venezuela). Peu de temps après la signature du Traité de 1962 sur l'interdiction des essais dans l'atmosphère, le niveau du carbone 14 dans l'hémisphère Nord était deux fois plus élevé que le niveau naturel chiffré à 100 sur le graphique. La baisse du carbone 14 atmosphérique après 1963 est due à une forte absorption du carbone 14 des essais par les océans et la biosphère. La courbe en tirets pointés montre la réponse calculée de la biosphère à l'augmentation du carbone 14 dans le dioxyde de carbone atmosphérique, l'hypothèse étant que la biosphère est un réservoir bien mélangé avec un taux de renouvellement du carbone de 15 ans. La biosphère terrestre est probablement le réservoir le plus complexe qui participe au cycle mondial du carbone. L'observation du carbone 14 atmosphérique permet de déterminer la nature et la dynamique de ce réservoir.



Source: Hessheimer et coll., *Nature*, 370 (1994), 201-203; Levin, I., Thèse B, Université de Heidelberg (1994).

**Concentration de krypton 85 dans la troposphère**

Le krypton 85 (période de 10,76 ans) est un produit de fission qui se dégage dans l'atmosphère au cours du retraitement du combustible nucléaire épuisé. Sa concentration est toujours plus faible dans l'hémisphère Sud, car les principales usines de retraitement sont situées dans l'hémisphère Nord et une partie du krypton 85 rejeté à des latitudes nord moyennes se désintègre avant même son transport vers l'hémisphère Sud. La courbe de concentration du krypton 85 dans la troposphère méridionale, que montre le second graphique, sert à étalonner les paramètres physiques des modèles de circulation planétaire de l'atmosphère. Le krypton 85, gaz inerte, est un excellent indicateur des eaux souterraines récentes.



Source: Weiss et coll., STI/PUB/B59, AIEA (1992); W. Weiss, Fort. Strahl. Umwelt. Radioec. (1993).

Le bilan du cycle global du carbone fait apparaître un grand problème, celui du «récepteur manquant» du CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère par les combustibles fossiles à raison de six gigatonnes par an. D'après les observations, à peu près 50 %, soit trois gigatonnes, demeurent dans l'atmosphère. Par ailleurs, les modèles de circulation océan-atmosphère indiquent que les océans ne sont capables d'absorber que deux gigatonnes par an. Il reste donc une gigatonne. Le «récepteur manquant» doit en fait recueillir le double, car la production de CO<sub>2</sub> dans la biosphère imputable aux changements de pratique agricole représente un apport de l'ordre d'une gigatonne par an.

Les résultats des observations du <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> atmosphérique offrent un moyen séduisant de cerner le cycle global du carbone. De fait, une étude récemment publiée, fondée sur les analyses des concentrations de carbone 14 dans la troposphère, laisse entendre que les océans absorberaient environ 25 % moins de CO<sub>2</sub> d'origine anthropique qu'on ne le supposait. Aussi faut-il continuer à chercher le récepteur complémentaire qui n'apparaît pas dans le cycle mondial actuel du carbone.

#### **Amélioration des modèles de transport atmosphérique**

Le krypton 85 est rejeté dans l'atmosphère par les usines de retraitement du combustible nucléaire épuisé, dont les principales sont situées en Amérique du Nord, en Europe et en Fédération de Russie, entre 30° et 50° de latitude nord. Les concentrations actuelles de krypton 85 (environ 1 Bq·m<sup>-3</sup>) sont facilement mesurables par comptage du rayonnement de désintégration. Ce gaz est un excellent indicateur atmosphérique, car il est chimiquement inerte et s'élimine essentiellement par décroissance radioactive.

Une connaissance quantitative de la circulation atmosphérique mondiale est impérative pour faire des bilans planétaires valables des polluants atmosphériques et de leurs incidences climatiques. Deux aspects du phénomène doivent être correctement décrits: i) l'échange d'air à grande échelle entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud, ii) l'importance du mélange vertical. Vu la complexité des processus en question, il est indispensable de faire appel à des modèles numériques. Les modèles dits de circulation générale sont les plus élaborés et servent aussi à prédire les effets des émissions de gaz à effet de serre sur le climat. La distribution mondiale du krypton 85 est utile pour ajuster les paramètres des modèles relatifs au transport et au mélange à grande échelle intervenant entre les hémisphères Nord et Sud (voir le graphique, page précédente). D'autres processus à considérer, tel le mélange par convection à l'intérieur de la troposphère, en particulier dans les régions tropicales et au-dessus

des masses continentales de l'hémisphère Nord, ne peuvent être déterminés par la distribution atmosphérique du krypton 85, car les échelles de temps sont beaucoup trop limitées. Aussi faut-il recourir à d'autres indicateurs, tel le radon 222.

#### **Perspectives**

On ne saurait trop insister sur l'importance de la découverte de la radioactivité pour les sciences de la terre. Il y a longtemps déjà que les radioisotopes naturels sont une source de renseignements, et bien souvent la seule, sur la chronologie des phénomènes géologiques, l'histoire des météorites, les rayons cosmiques, l'évolution de l'être humain et la dynamique des systèmes biologiques. Les radioisotopes artificiels, bien que perçus par le public comme un danger pour l'environnement humain, se sont révélés d'excellents traceurs à l'échelle planétaire, qui nous aident à mieux comprendre le cycle hydrologique ainsi que les cycles biogéochimiques des éléments vitaux que sont l'azote, le carbone ou le soufre.

À l'aube du prochain siècle, les problèmes que pose l'évolution mondiale de l'environnement s'inscrivent parmi les premiers à l'ordre du jour de maintes organisations internationales, dont celles du système des Nations Unies. L'évolution hydroclimatique à court terme de la planète et l'influence de l'activité humaine sur le climat sont désormais les grandes questions que devront nécessairement aborder en priorité les scientifiques dans l'avenir immédiat.

La quantification des réactions possibles du climat terrestre aux contraintes d'origine humaine est cruciale, en particulier pour la zone intertropicale. Celle-ci, principalement occupée par des pays en développement, est soumise à des variations hydroclimatiques extrêmes, telles la sécheresse et les inondations, qu'il est essentiel, dans l'intérêt du développement durable de cette région, de pouvoir prédire à temps. Aussi les méthodes scientifiques fondées sur les isotopes tant radioactifs que stables sont-elles appelées à jouer un rôle important dans l'étude des mécanismes et des processus qui conditionnent l'évolution hydroclimatique permanente de notre planète.