

Les isotopes en climatologie

Les isotopes de l'environnement facilitent l'étude de nos climats

par Kazimierz Rozanski et Roberto Gonfiantini

Le vif intérêt que suscitent subitement les études climatologiques est essentiellement dû à l'inquiétude croissante des milieux scientifiques devant l'aggravation rapide des effets de l'activité humaine sur l'écosystème planétaire qui risque de provoquer des changements significatifs de nos climats dans un avenir proche. Le principal sujet de préoccupation vient de l'observation des modifications de l'atmosphère terrestre, probablement le composant le plus vulnérable de toute l'écosphère.

L'information recueillie montre clairement que la concentration de certains constituants de l'atmosphère, présents à l'état de trace, tels l'anhydride carbonique, le méthane, l'oxyde de carbone, l'ozone, les chlorofluorocarbures (CFCs), et les oxydes d'azote et de soufre, augmente en raison des émissions d'origine humaine. Cette variation peut avoir des conséquences fâcheuses de grande portée dans un avenir proche, car elle influe directement sur la biosphère — dont l'homme fait partie — et, indirectement, sur les conditions nécessaires à la vie, qu'elle modifie. L'échauffement général de l'atmosphère dû à l'augmentation rapide de sa teneur en certains de ses composants — ce que l'on appelle « l'effet de serre » — est peut-être le meilleur exemple des conséquences de cette évolution.

De fait, la température moyenne des couches basses de l'atmosphère augmente depuis un siècle, probablement parce que notre planète traverse une période de changements climatiques mineurs, ce qui lui est souvent arrivé dans le passé. Or, on s'attend que le taux d'élévation de la température, qui a été d'environ d'un demi-degré centigrade au cours des 100 dernières années, augmentera fortement dans le proche avenir et aura des conséquences que l'on prévoit dramatiques, telles que fonte partielle des calottes glaciaires, accompagnée d'une élévation du niveau de la mer avec inondations des basses terres des régions côtières, changement de la distribution des précipitations et du régime des cours d'eau, et expansion des zones arides.

Cette augmentation prévue de la température moyenne de l'air sera due à un accroissement de la quantité d'énergie piégée par certains des gaz présents à l'état de trace dans l'atmosphère, lesquels interceptent le rayonnement infrarouge de la planète qui, autrement, se dissiperait dans l'espace. Les principaux gaz à effet de serre sont l'anhydride carbonique et le méthane, dont la

concentration dans l'air augmente depuis le milieu du siècle dernier, essentiellement — mais pas exclusivement — à cause de la consommation croissante de combustibles fossiles (*tableau 1*).

Il est vrai, toutefois, que les prédictions sur l'impact et l'intensité de l'effet de serre sont imprécises du fait de la complexité des interactions environnementales et de notre connaissance encore insuffisante des phénomènes météorologiques et climatologiques à l'échelle mondiale. Par exemple, nous sommes encore loin d'avoir bien compris les processus qui régissent la composition de l'atmosphère et le mécanisme des interactions entre les grands compartiments de l'écosystème mondial — atmosphère, hydrosphère, biosphère et géosphère — qui déterminent la réponse climatique aux contraintes internes et externes. Au cours des dernières années, on est parvenu à la conclusion que le seul moyen de mieux comprendre la dynamique de ces phénomènes extrêmement complexes et non linéaires serait une approche intégrée combinant deux axes de recherche :

- **L'étude du climat actuel:** l'analyse des tendances révélées par l'observation; le perfectionnement des modèles de circulation atmosphérique générale; l'étude plus approfondie de l'effet des courants océaniques sur le climat; la définition et l'analyse des interactions importantes; l'étude des zones de résorption des gaz à effet de serre;

- **L'étude des paléoclimats:** la détermination plus précise des variations climatiques dans le passé, de leurs causes, de leur facteur temps et de leur amplitude; une reconstitution exacte du comportement de l'écosystème planétaire pendant les transitions entre les principales périodes glaciaires et interglaciaires; l'élaboration de modèles permettant de faire des projections valables pour l'avenir à partir des variations climatiques du passé.

Les isotopes de l'environnement, dont la distribution dans les composés du milieu naturel est régie par les conditions régnant dans ce milieu, sont un des moyens les plus efficaces pour l'étude des variations climatiques et de leurs effets sur l'environnement. Nous allons voir comment ces isotopes ont contribué à nos connaissances actuelles en climatologie et en paléoclimatologie. Nous parlerons également du rôle de l'AIEA dans l'acquisition et l'élaboration des données isotopiques pertinentes.

Comment se sert-on des isotopes?

Le meilleur exemple que l'on puisse citer est peut-être leur emploi en géochimie, pour la datation. Nombre

M. Gonfiantini est chef de la section de l'hydrologie isotopique, Division des sciences physiques et chimiques (AIEA); M. Rozanski est membre de cette même section.

Tableau 1. Evolution de la concentration des principaux gaz à l'état de trace dans l'atmosphère

Gaz	Concentrations		Variations observées en 1975-1985 (%)	Milieu du 21ème siècle
	Avant 1850	1985		
CO ₂	275 ppmv	345 ppmv	4,6	400-600 ppmv
CH ₄	0,7 ppmv	1,7 ppmv	11,0	2,1-4 ppmv
N ₂ O	0,285 ppmv	0,304 ppmv	3,5	0,35-0,45 ppmv
CFC-11	0	0,22 pp10 ⁹	103	0,7-3 pp10 ⁹
CFC-12	0	0,38 pp10 ⁹	101	2,0-4,8 pp10 ⁹

Source: D'après V. Ramanathan, *Science*, **240** (1989) p. 293 à 299.

ppmv = partie par million (en volume).

pp10⁹ = partie par milliard (en volume).

de méthodes fondées sur la désintégration des radio-isotopes ou sur l'accumulation de leurs produits de filiation ont été mises au point et permettent de déterminer l'âge des eaux souterraines, des glaces, des roches, des sédiments, etc.

Depuis quelques années, on constate que ces méthodes prennent un nouvel essor grâce au perfectionnement de la spectrométrie de masse basée sur accélérateur — méthode analytique toute nouvelle qui permet de doser de faibles concentrations d'isotopes du milieu dans de très petits échantillons.

En climatologie, il est théoriquement possible de recourir à diverses méthodes isotopiques de datation lorsqu'il s'agit de déterminer avec une certaine précision la chronologie d'événements climatiques du passé; le choix dépend de l'ancienneté et de la nature du système

que l'on veut étudier. On a recours aussi bien aux radio-isotopes naturels présents *in situ* qu'aux radio-isotopes artificiels. Jusqu'à présent, la méthode la plus communément utilisée est celle qui se fonde sur le carbone 14, isotope radioactif du carbone dont la période de 5730 ans permet de dater en remontant dans le passé de quelques siècles à 40 000 ans environ. De nombreux autres radio-isotopes de période beaucoup plus courte ou beaucoup plus longue sont également couramment utilisés en paléoclimatologie (tableau 2).

La teneur des composés naturels en isotopes stables est variable, car le comportement de ces isotopes au cours des processus physico-chimiques naturels varie légèrement, lui-aussi, selon leur masse. Comme l'importance du fractionnement isotopique est fonction des paramètres qui déterminent ces processus, dont le plus

Tableau 2. Isotopes utilisés en climatologie

Isotope	Matières étudiées	Informations obtenues
Isotopes stables:		
deutérium (hydrogène 2)	— sédiments marins	température de l'océan,
oxygène 18	— sédiments lacustres	circulation océanique,
carbone 13	— carottes de glace	volume des couches de glace,
	— spéléothèmes	température de l'air, humidité relative,
	— eaux souterraines	dynamique du cycle hydrologique
	— précipitations	régional et mondial
Radio-isotopes artificiels:		
tritium (hydrogène 3)	— eau océanique	dynamique océanique,
krypton 85	— carbonates océaniques	dynamique atmosphérique,
césium 137	— sédiments lacustres	taux de sédimentation
carbone 14	— eaux souterraines	
	— précipitations	
	— atmosphère	
Radio-isotopes naturels:		
radon 222, plomb 210, argon 39	— sédiments marins	datation
carbone 14, thorium 230, protactinium 231	— sédiments lacustres	des sédiments des grands fonds marins,
uranium 234, uranium 238, potassium 40	— spéléothèmes	des sédiments lacustres,
	— eaux océaniques	des spéléothèmes,
	— eaux souterraines	des eaux océaniques,
	— atmosphère	des eaux souterraines,
		dynamique de l'atmosphère

important est la température, il est possible de déduire les conditions environnementales qui ont présidé à un processus donné d'après la teneur en isotopes stables de l'eau, de la glace et des substances minérales.

Les éléments dont les teneurs variables sont le plus fréquemment utilisées en climatologie sont les isotopes lourds de l'hydrogène et de l'oxygène, c'est-à-dire l'hydrogène 2 (ou deutérium) et l'oxygène 18, qui permettent de déterminer les changements provoqués par le climat dans le cycle hydrologique. Le carbone 13, isotope lourd, semble être aussi un excellent indicateur.

On peut résumer en disant qu'en climatologie géochimique, de même que dans d'autres domaines de la géochimie, les radio-isotopes du milieu servent d'indicateurs temporels tandis que les isotopes stables sont des indicateurs de température. Nous allons maintenant examiner brièvement les principales applications des techniques fondées sur les isotopes naturels à l'étude de l'histoire climatologique de notre planète.

Les océans

Du fait qu'il est relativement homogène, l'océan est un milieu idéal pour garder la trace des grandes variations climatiques à long terme. De fait, étant donné sa masse considérable et, par conséquent, son inertie thermique, chimique et isotopique, les fluctuations climatiques de courte durée ne peuvent avoir sur lui que des effets limités, souvent même négligeables.

C'est dans les sédiments marins que l'on a d'abord cherché des renseignements isotopiques pour les études paléoclimatologiques. Le rapport oxygène 18/oxygène 16 dans les carbonates dont est faite la capsule des foraminifères, protozoaires marins présents dans les carottes de sédiments, est fonction de celui de l'eau de mer et de sa température. Ces deux facteurs agissent dans le même sens au cours des fluctuations climatiques des périodes glaciaires et interglaciaires, accentuant les variations des teneurs isotopiques du carbonate de calcium. On a constaté que les variations de ce rapport dans les capsules des foraminifères concordent assez bien avec les variations probables de l'insolation dues aux modifications cycliques des paramètres de l'orbite terrestre et avec les variations climatiques résultantes selon la théorie de Milankovitch. En datant parallèlement des tronçons de carottes de sédiments à l'aide de méthodes fondées sur le radiocarbone, sur le déséquilibre radioactif de la famille de l'uranium ou sur le potassium-argon, on a pu établir une chronologie précise et évaluer les variations de température des océans pendant presque toute la durée de l'ère quaternaire (figure 1B).

Par ailleurs, on peut considérer que l'application à l'océanographie physique moderne des méthodes fondées sur les isotopes naturels facilite indirectement les études climatologiques. En réalité, bien que les océans actuels soient très homogènes, on peut y trouver de légères différences de composition chimique et isotopique. Ces différences, ainsi que les variations de la teneur en tritium et en carbone 14, peuvent servir à déterminer le comportement de différentes masses d'eau ainsi que leur circulation en profondeur, et à étudier le mélange des eaux des couches supérieures et des

couches profondes de l'océan. Il est indispensable de savoir comment circulent les eaux des océans actuels pour déterminer leur impact météorologique sur le climat mondial.

Les calottes polaires

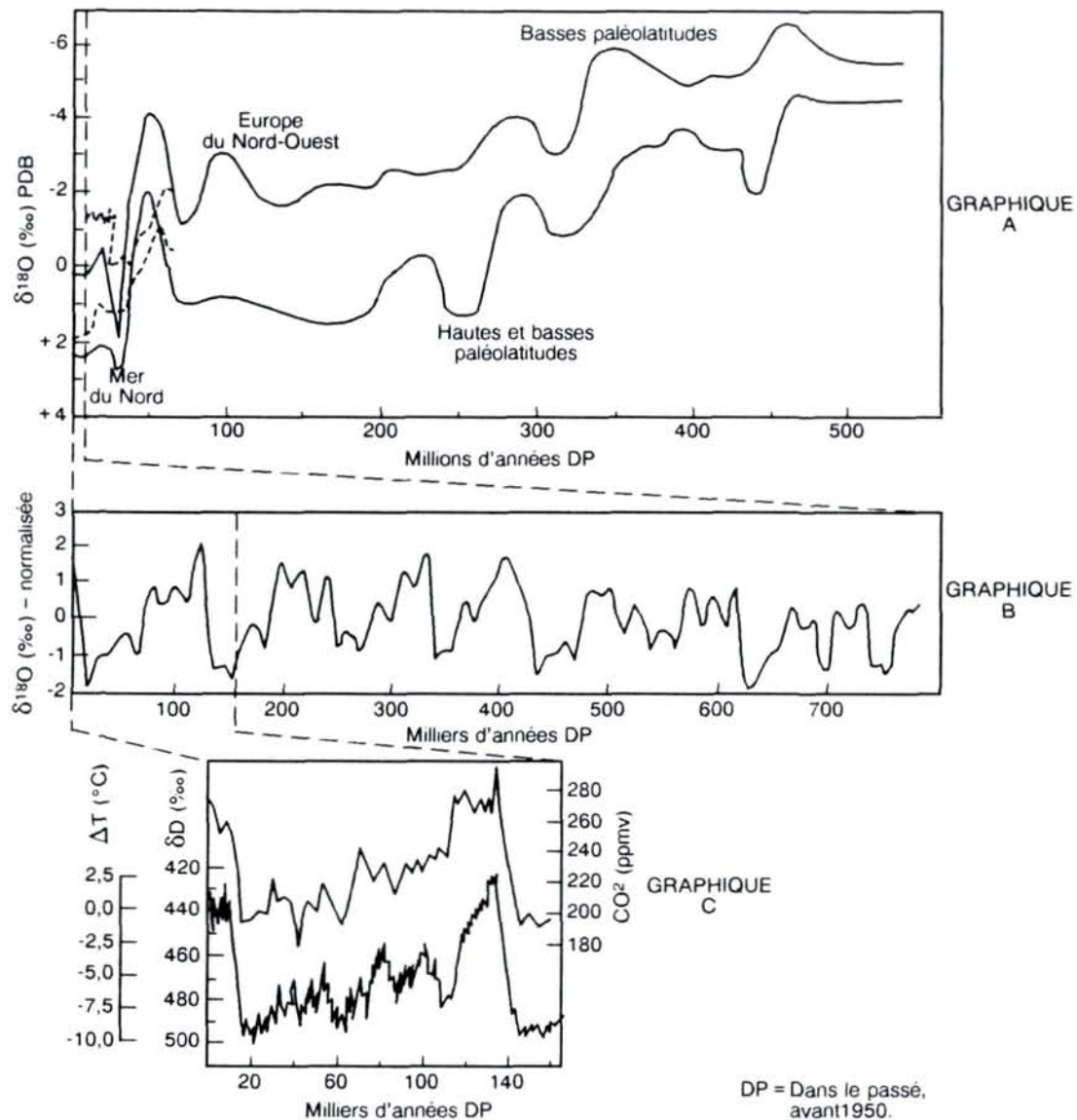
Les vastes calottes glaciaires des hautes latitudes (Groenland, Antarctique) se sont révélées d'excellents témoins du climat du pléistocène. En vérité, une grande partie de nos connaissances sur les variations du climat de l'ère quaternaire sont déduites de la composition isotopique des glaces polaires.

Ces calottes glaciaires, formées par des chutes de neige sur de vastes régions pratiquement sans relief où les températures annuelles moyennes demeurent au-dessous de zéro, conservent la structure stratifiée des couches déposées chaque année, dont l'épaisseur va décroissant avec la profondeur, essentiellement à cause du tassement qui transforme progressivement la neige en névé, puis en glace.

Les rapports oxygène 18/oxygène 16 et hydrogène 2/hydrogène 1 dans les précipitations sont fortement dépendants de la température de formation de ces dernières: aux basses températures, les précipitations sont pauvres en isotopes. Sous les latitudes moyennes et les hautes latitudes, les fortes variations saisonnières de température s'accompagnent de variations concomitantes de la composition isotopique des précipitations, les concentrations d'isotopes lourds étant plus fortes en été qu'en hiver. Ces variations saisonnières de composition isotopique se retrouvent dans les calottes glaciaires jusqu'à une grande profondeur (de 1 à 1,5 km environ), malgré les phénomènes de diffusion qui tendent à estomper les différences. En comptant les cycles isotopiques annuels qui se succèdent verticalement, on peut dater la glace et évaluer son taux d'accumulation.

La corrélation entre la température et la composition isotopique permet aussi d'identifier les glaces formées pendant les périodes glaciaires, lesquelles doivent normalement être très pauvres en isotopes lourds par rapport aux précipitations de notre époque. C'est effectivement ce qu'ont permis d'observer les forages profonds que l'on a pratiqués jusqu'à présent dans les glaces polaires. Les variations des teneurs en oxygène 18 et en deutérium fixées dans la glace ont permis de reconstituer d'une façon précise les paléotempératures qui ont régné dans les hautes latitudes au cours du dernier cycle glaciaire/interglaciaire (figure 1C). En outre, l'analyse chimique des bulles d'air prises dans les glaces, jointe à celle de la composition isotopique de la glace, a permis de déterminer les concentrations d'anhydride carbonique et de méthane dans l'air au cours des 160 000 dernières années. Le profil de l'anhydride carbonique déduit de la carotte de glace de Vostok (Antarctique) (figure 1C) suit exactement la courbe des températures établie d'après le profil du deutérium, et indique une étroite relation entre l'anhydride carbonique et le climat. On pense d'ailleurs que les variations de la teneur en anhydride carbonique que l'on a constatées sont liées aux variations de la circulation des eaux océaniques selon le climat plutôt qu'à l'effet de serre. Pour une interprétation plus précise, il faudrait en particulier

Figure 1. Les isotopes naturels, indicateurs des paléoclimats



Les graphiques donnent quelques exemples choisis des variations des concentrations d'oxygène 18 et de deutérium dues au climat et inscrites dans l'environnement, à savoir dans les sédiments marins et dans les glaces polaires.

Les lignes continues du graphique A montrent les variations de la composition isotopique de l'oxygène dans des fossiles marins bien conservés. Ces données peuvent être converties, compte tenu de certaines hypothèses, en températures. On pense qu'au-delà de 50 millions d'années environ les variations observées sont principalement dues à des bouleversements de la circulation océanique, responsables des différences très sensibles de teneur isotopique entre les couches profondes et les couches superficielles des océans.

Le graphique B est une courbe normalisée des variations de l'oxygène 18 dans des capsules de foraminifères extraites de cinq carottes prélevées dans des sédiments des grands fonds marins. Les phénomènes isotopiques qui accompagnent l'évaporation et la condensation des eaux océaniques provoquent une accumulation préférentielle de l'oxygène 16 dans les glaces lors de leur avance au cours de la période glaciaire, d'où l'enrichissement des océans restants en oxygène 18. En se retirant, les glaciers restituent à l'océan leur eau appauvrie en isotopes. Par ailleurs, le fractionnement de l'oxygène 18 entre le carbonate des capsules de foraminifères et l'eau de mer dépend de la température. Les capsules formées aux températures plus élevées de l'océan sont normalement plus riches en oxygène 18. Les calculs montrent qu'environ 70% de l'amplitude totale des variations de la teneur en oxygène 18 que cette courbe représente peuvent être attribués aux variations volumiques des glaciers. Le reste est imputable aux variations de température.

Le graphique C montre l'évolution de la concentration d'anhydride carbonique de l'atmosphère retenu dans les bulles d'air (courbe supérieure), et la température de l'air en surface déduite du profil du deutérium (courbe inférieure), en fonction des temps relevés sur la carotte de glace de Vostok. Le profil de l'anhydride carbonique suit la courbe de température, ce qui indique un rapport étroit entre la teneur de l'atmosphère en anhydride carbonique et le climat.

Notes: Les courbes de concentration du deutérium et de l'oxygène 18 représentent la déviation δ , exprimée en millièmes, par rapport à la norme (PDB pour l'oxygène 18 des carbonates et V-SMOW pour l'oxygène 18 et le deutérium de l'eau).

Sources: Graphique A — d'après L.B. Railsback, *Geochimica et Cosmochim. Acta*, 54 (1990) p. 1601 à 1609. Graphique B — Imbrie et col., *Milankovitch and Climate*, Partie I, revu par A.L. Berger et col., publié par D. Riedel (1984) p. 269 à 305. Graphique C — Barnola et col., *Nature*, 329 (1987) p. 408 à 414.

déterminer la variation de la teneur en carbone 13 de l'anhydride carbonique contenu dans les bulles d'air. Les profils de ce gaz et des isotopes établis à partir des carottes de glace extraites au Groenland présentent des analogies frappantes avec les profils établis pour l'Antarctique, ce qui sous-entend un synchronisme général des grandes transitions climatiques dans les hémisphères Nord et Sud.

L'environnement continental des moyennes et basses latitudes

Les études que nous venons de mentionner brièvement se limitent au milieu marin et à l'environnement polaire, lesquels offrent des conditions idéales pour des études isotopiques, le premier grâce à son homogénéité qui permet de détecter des effets relativement de faible ampleur, et le second parce que les variations climatiques y sont plus spectaculaires.

Il n'en reste pas moins que les variations climatiques dans les zones continentales des moyennes et basses latitudes présentent également un grand intérêt, d'autant que les différences relativement importantes, aussi bien d'intensité que de chronologie, de la réponse climatologique aux contraintes internes et externes varient probablement d'une région géographique à l'autre. Il est évident que la connaissance de l'évolution des climats des différentes régions du monde dans le passé peut être très utile pour prédire les effets des variations climatiques futures.

Les sédiments lacustres sont parmi les matières continentales les plus intéressantes aux fins des reconstitutions paléoclimatiques. Ces matières contiennent souvent des carbonates dont la teneur en isotopes de l'oxygène est fonction de celle du lac dont elles sont extraites. S'il s'agit d'un lac ouvert dont le renouvellement est rapide, la composition isotopique de ses eaux est la même que celle des précipitations qui tombent sur le bassin de ce lac, laquelle dépend à son tour de la température. Ainsi, les périodes de climat froid ou de climat tempéré se traduisent par des valeurs minimales ou maximales de la teneur en oxygène 18 de ces carbonates.

Le cas des lacs pratiquement fermés est plus complexe, car la composition isotopique de leurs eaux dépend dans une large mesure de l'évaporation et des échanges avec l'humidité atmosphérique. Dans ce cas, c'est aux modifications du bilan hydrique qu'il faut imputer les variations de la teneur en isotopes de l'oxygène dont témoignent les carbonates déposés, les périodes de sécheresse correspondant à une forte teneur en oxygène 18 du fait de l'augmentation de l'évaporation, car celle-ci prélève de préférence l'eau de composition isotopique légère.

Les études isotopiques faites jusqu'à ce jour ont permis de reconstituer dans le détail les conditions climatiques et hydrologiques qui ont régné pendant la dernière période de transition glaciaire-interglaciaire et pendant l'holocène inférieur en Europe centrale, en Afrique du Nord et en Amérique du Nord. Des différences sensibles ont été constatées entre ces diverses régions en ce qui concerne tant la chronologie que le caractère de la transition. Par exemple, plusieurs fluc-

tuations humidité/aridité ont laissé leurs traces dans des dépôts lacustres du Sahara et du Sahel. Au Sahara, les dernières périodes humides d'importance se situent entre 14 500 et 11 000 ans et 9300 et 7500 ans avant notre époque. D'après les données isotopiques dont on dispose, il est probable que la plupart des eaux souterraines des nappes aquifères sahariennes datent de ce temps-là.

Les eaux souterraines sont, elles aussi, une source d'information paléoclimatologique. Leur composition isotopique correspond en général à la composition isotopique moyenne des précipitations sur leur bassin d'alimentation. Il s'ensuit que les variations de la teneur isotopique des précipitations en rapport avec les variations climatiques se retrouvent dans la composition isotopique des eaux souterraines. De même, les gaz rares de l'atmosphère dissous dans les eaux souterraines (néon, argon, crypton, xénon) peuvent, eux aussi, lorsque les conditions sont propices, donner de précieuses indications sur les paléoclimats. Dans les nappes aquifères poreuses, les concentrations de gaz rares sont directement liées à la température annuelle moyenne de la zone d'alimentation et peuvent donc servir à déterminer les variations de cette température dans le passé.

L'emploi des eaux souterraines comme indicateur climatique présente néanmoins certaines difficultés. En effet, il est rare que l'on puisse les considérer comme un système fermé. Par ailleurs, les phénomènes de diffusion et de dispersion dans les nappes aquifères, les mélanges des eaux de différentes nappes dus aux infiltrations ou aux discontinuités des formations cloisonnantes et les interactions avec la roche encaissante tendent à masquer ou à atténuer les effets des différences de climat et compliquent la datation de l'eau au carbone 14. Néanmoins, un indice climatique particulier — la modification de la teneur en deutérium et en oxygène 18 accompagnant la transition entre la fin de la période glaciaire et l'holocène — a été constaté dans plusieurs nappes aquifères confinées de l'hémisphère Nord.

De même, le carbonate de calcium déposé dans les grottes karstiques sous diverses formes — stalactites, stalagmites et autres spéléothèmes — peut présenter de l'intérêt en paléoclimatologie isotopique. Ces formations résultent d'un lent processus de percolation des eaux souterraines pendant de longues périodes, dans des conditions proches de l'équilibre thermodynamique, dans un environnement où les variations saisonnières de la température, de l'humidité de l'air et de la composition isotopique de l'eau et de l'anhydride carbonique dissous sont atténuées. Il s'ensuit que seules les variations climatiques à long terme devraient apparaître dans la composition isotopique du carbonate de calcium et des inclusions d'eau de ces formations, dont la datation est généralement faite par la méthode fondée sur le déséquilibre radioactif de la famille de l'uranium.

Les matières organiques d'origine végétale peuvent aussi servir aux études paléoclimatologiques, car leur teneur en isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène découle de celle de l'eau du sol et des précipitations, par l'intermédiaire d'un enchaînement assez complexe de processus et de réactions chimiques. Il faut néanmoins utiliser ces matières avec prudence, car elles peuvent garder la trace des variations des conditions ambiantes

particulières dans lesquelles les plantes se sont développées.

L'atmosphère et les modèles planétaires de circulation

L'analyse systématique de la composition isotopique des eaux météoriques (précipitations, vapeur atmosphérique) aide à comprendre les rapports qui s'établissent entre les précipitations et les principaux facteurs qui régissent les conditions météorologiques et le climat. A cet égard, le réseau mondial de stations dirigé conjointement par l'AIEA et l'Organisation météorologique mondiale (OMM) joue un rôle capital depuis le début des années 60 en recueillant chaque mois des échantillons des précipitations pour déterminer leur teneur en tritium, deutérium et oxygène 18. La plupart de ces échantillons sont analysés par le Laboratoire d'hydrologie isotopique, au Siège de l'AIEA, à Vienne, et le reste par plusieurs laboratoires associés. Depuis quelques années, le nombre de stations bénéficiant de ce service s'est accru du fait de la création de réseaux nationaux dans plusieurs Etats Membres.

Cette remarquable base de données isotopiques constituée en 30 ans d'observation ne cesse de s'enrichir

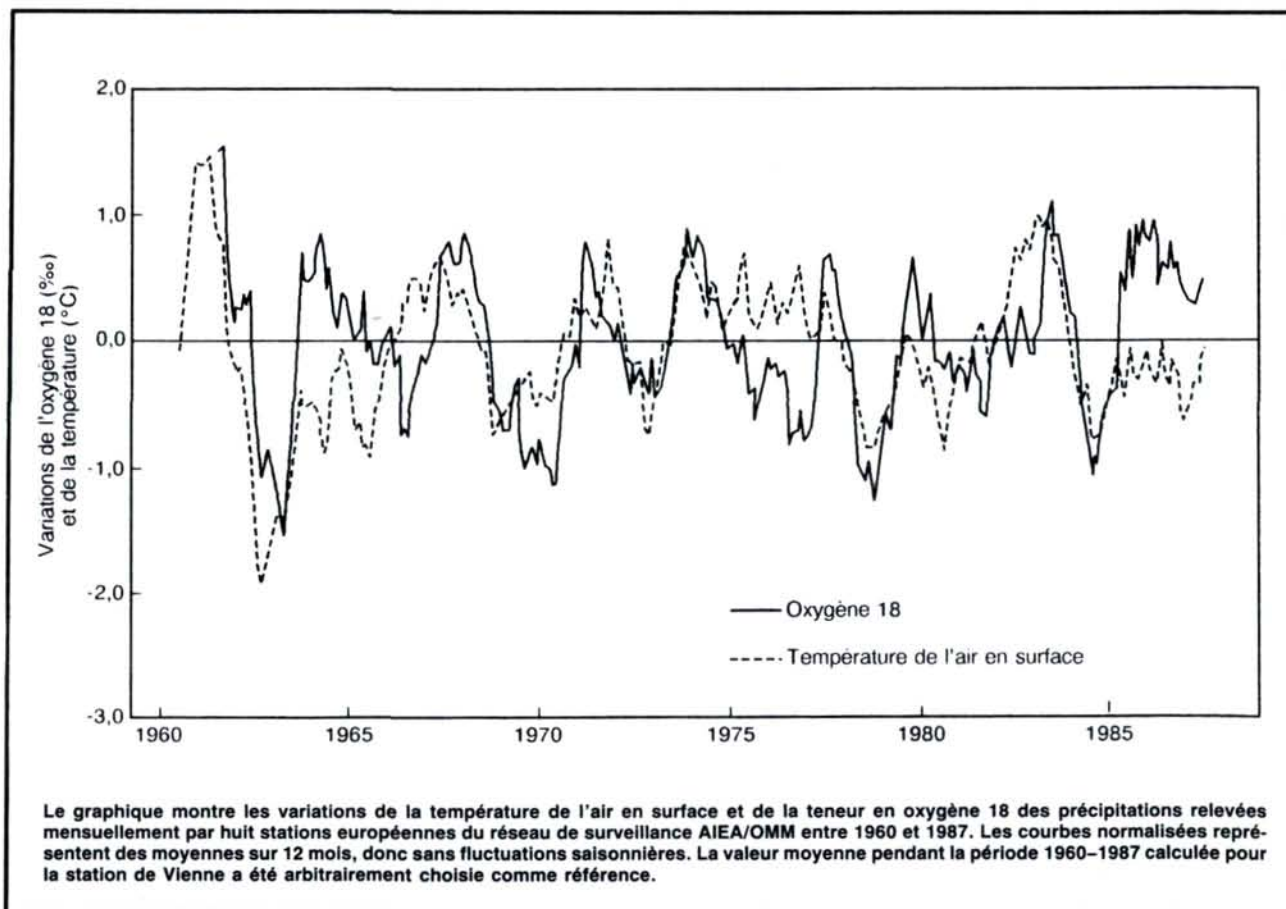
et permet d'étudier les variations de la teneur isotopique des précipitations, tant au niveau de leur localisation géographique et des caractéristiques météorologiques locales que sous l'angle de la circulation atmosphérique mondiale. Les variations des teneurs en isotopes stables résultent des processus qui accompagnent chaque étape du cycle hydrologique. Rappelons ici que la température est le paramètre le plus important (figure 2).

La distribution des isotopes stables des précipitations est particulièrement utile à l'établissement de modèles de la circulation atmosphérique mondiale. Ces modèles simulent le comportement de toute la masse atmosphérique, y compris ses interactions avec les océans, et permettent de prévoir la réponse du système à diverses contraintes internes et externes, telles la concentration croissante des gaz à effet de serre et les variations de l'insolation.

L'utilité de ces modèles est fonction du soin apporté au calcul des paramètres, lequel est facilité par l'analyse isotopique.

Les indicateurs transitoires que constituent le tritium produit par les explosions nucléaires et présent dans les précipitations, le radiocarbone de l'anhydride carbonique et du méthane atmosphérique, et le krypton 85 libéré dans l'atmosphère par les usines de retraitement

Figure 2. Fluctuations à long terme de la composition isotopique des précipitations et de la température de l'air en surface



du combustible nucléaire facilitent l'étude de la dynamique du système océan/atmosphère, soit des caractéristiques générales des mouvements de l'atmosphère et des océans et de leurs réactions mutuelles. Le tritium et les isotopes stables servent à étudier le transport de la vapeur d'eau entre les hémisphères et à travers les continents, à évaluer la fraction recyclée par évapotranspiration, et à analyser l'interaction entre la troposphère et la stratosphère. Le radiocarbone et le carbone 13 aident à évaluer la contribution de diverses sources (biologiques et fossiles) à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en anhydride carbonique et en méthane, et à déterminer leurs temps de séjour, les zones de résorption et les échanges réciproques avec les océans.

La recherche internationale

Le volume considérable de données isotopiques de tous ordres recueillies jusqu'à présent montre toute l'importance que revêtent les isotopes pour l'étude des climats. En ce qui concerne le paléoclimat en particulier, on dispose ainsi d'une information que l'on ne saurait obtenir autrement. Nombreux sont les laboratoires du monde entier qui appliquent les techniques isotopiques à des études climatologiques, dont le but ultime est de bien comprendre et de prédire avec précision les changements climatiques annoncés qui devraient devenir manifestes dès le siècle prochain.

Jusqu'à présent, la principale activité de l'Agence dans le domaine de la météorologie et du climat est sa participation au réseau AIEA/OMM de stations de mesure des isotopes dans les précipitations, conçu à l'origine pour les applications hydrologiques des isotopes de l'environnement. En outre, le Laboratoire d'hydrologie isotopique de l'Agence s'est beaucoup

occupé de paléohydrologie, discipline directement liée aux évaluations des ressources en eau des pays situés dans les zones arides, ressources souvent constituées de masses d'eau souterraines très anciennes, c'est-à-dire alimentées dans le passé dans des conditions climatiques plus favorables qu'aujourd'hui*.

Rappelons aussi la réunion, il y a dix ans, d'un groupe consultatif sur les applications des techniques isotopiques à l'étude paléoclimatologique des ressources en eau, dont le compte rendu a été publié par l'AIEA sous le titre *Palaeoclimates and Palaeowaters: A Collection of Environmental Isotope Studies*.

De son côté, la Division des sciences physiques et chimiques de l'AIEA prévoit d'organiser prochainement deux programmes de recherche coordonnée en climatologie.

Le premier, qui sera consacré à l'étude des variations du contenu isotopique de l'anhydride carbonique et d'autres gaz à l'état de traces dans l'atmosphère, vise à mieux connaître le rôle des gaz à effet de serre et autres gaz à l'état de traces dans l'écosystème planétaire. Les études porteront notamment sur la dynamique de ces gaz et sur leur taux d'émission et d'extraction par les processus naturels et artificiels. Ce programme sera mis en œuvre en 1991, après une réunion préparatoire de consultants en décembre de cette année.

Le second programme de recherche coordonnée, prévu pour 1992, portera essentiellement sur la reconstitution des paléoclimats intéressant les régions continentales, à l'aide d'indicateurs isotopiques. Il sera lui aussi précédé d'une réunion préparatoire de consultants vers la fin de 1991.

* Voir «Prospection des ressources hydrologiques du désert: rôle des isotopes», *Bulletin de l'AIEA*, vol. 23, n° 1 (1981).