

Les isotopes et la recherche environnementale

L'étude du bassin amazonien facilite l'analyse des effets de la conversion des terres sur l'écologie et le climat

par Glynn Bowen, Kazimierz Rozanski et Peter Vose

La menace d'une modification sensible de notre environnement se précise chaque jour davantage.

L'augmentation rapide de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la dégradation des ressources d'eau, la déforestation et la pollution industrielle ne sont que quelques exemples des contraintes croissantes que subit l'écosystème de la planète. Il est urgent de se faire une idée juste des conséquences socio-économiques possibles de ces changements en profondeur et d'élaborer des stratégies capables d'y répondre. Pour ce faire, il faudrait beaucoup améliorer notre connaissance de ces systèmes extrêmement complexes composés d'éléments hétérogènes obéissant à de multiples mécanismes réactionnels.

Les problèmes de l'environnement peuvent se situer dans différents ordres de grandeur, d'ailleurs interdépendants. Par exemple, certains peuvent intéresser un périmètre limité, comme l'érosion des sols fragiles surexploités; une mauvaise gestion des ressources, en particulier si elle touche une vaste zone, aura des effets à distance, telle l'eutrophisation des eaux par les nitrates et les phosphates; le déboisement peut influencer sur la sédimentation fluviale, la qualité de l'eau et les chaînes alimentaires de la faune aquatique; les effets à longue distance d'une activité peuvent modifier l'aspect de toute une région — par exemple, la destruction intensive de la forêt vierge peut éventuellement modifier le régime des précipitations; les pluies acides peuvent aussi avoir une origine lointaine. Enfin, des effets très préoccupants touchent le monde entier, notamment l'évolution du climat accompagnée d'un échauffement général de l'atmosphère terrestre.

Il y a longtemps que les isotopes stables et radioactifs se sont révélés extrêmement utiles pour l'étude des aspects physiques et biologiques du fonctionnement de l'écosystème planétaire. Ils ont reçu de nombreuses applications dans la recherche sur l'environnement et interviennent à tous les niveaux.

Nous ne parlerons que de quelques-unes de ces applications à l'étude des problèmes environnementaux. Nous concentrerons notre attention sur le bassin amazonien.

Le bassin amazonien

Cette région, d'une superficie de six millions de kilomètres carrés, est la zone continentale d'évaporation la plus vaste du monde. Elle héberge à peu près la moitié de la forêt tropicale, quelque 80 000 espèces végétales et peut-être 30 millions d'espèces animales, pour la plupart des insectes. L'Amazone déverse dans l'océan 20% du débit fluvial mondial. Cet écosystème incomparable d'importance planétaire est actuellement gravement menacé par un déboisement généralisé. Au cours des dix dernières années, 180 000 kilomètres carrés environ de forêt vierge ont disparu de l'Amazonie brésilienne.

Il y a déjà longtemps que l'AIEA s'occupe de la recherche environnementale à l'aide des isotopes au Brésil, où divers projets sont assistés par des programmes de coopération technique. L'opération la plus ambitieuse à ce jour a démarré en 1985. Il s'agit d'un projet multidisciplinaire de grande envergure comportant une étude des effets de la conversion des terres sur l'écologie et le climat de l'Amazonie brésilienne. Quelque 80 scientifiques venant de divers établissements brésiliens y collaborent, ainsi que la Division mixte FAO/AIEA et la Section de l'hydrologie isotopique de la Division des sciences physiques et chimiques de l'Agence.

Sur place, le projet est coordonné par la Commission nationale de l'énergie atomique (CNEN) et divers établissements brésiliens y collaborent, de même que plusieurs institutions extérieures au Brésil. A noter par exemple l'importante contribution du Gouvernement suédois au programme d'hydrologie par l'intermédiaire de l'Office suédois pour la coopération dans la recherche avec les pays en développement, et les liaisons avec l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer (ORSTOM) (France), la National Science Foundation (Etats-Unis), l'Institut Max Planck de Limnologie (Allemagne), le Département des sciences de la terre de l'Université de Waterloo (Canada), le World Wildlife Fund, et d'autres institutions encore.

Bilans hydriques régionaux — évapotranspiration

Les isotopes de l'environnement sont extrêmement utiles pour l'étude des cycles hydrologiques, en partie parce que trois isotopes différents incorporés à la molécule d'eau peuvent servir d'indicateurs. Le tritium, isotope radioactif, est particulièrement intéressant lorsqu'il s'agit d'étudier la dynamique du mouvement

M. Bowen est chef de la section de la fertilité des sols, de l'irrigation et de la production agricole, Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, et M. Rozanski est membre de la section de l'hydrologie isotopique, Division des sciences physiques et chimiques. M. Vose était conseiller technique principal du projet de l'AIEA concernant l'Amazonie.

des eaux dans les différents compartiments de l'hydrosphère, tant sur le plan local qu'à l'échelle mondiale. Quant aux isotopes lourds et stables de l'hydrogène et de l'oxygène (deutérium et oxygène 18), ils fournissent des renseignements sur les caractéristiques permanentes du cycle hydrologique.

La teneur des précipitations en tritium, deutérium et oxygène 18 est relevée tous les mois depuis le début des années 60 par les stations du réseau mondial géré conjointement par l'AIEA et l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Cette base de données exceptionnelle permet de multiplier les applications des isotopes du milieu à l'hydrologie, à la climatologie et à l'étude de l'atmosphère. (Voir l'article sur ce sujet dans le présent numéro du Bulletin.)

Depuis quelques années, les méthodes isotopiques sont de plus en plus sollicitées pour l'étude des divers aspects du transport de l'eau dans l'atmosphère. La méthodologie a évolué et l'on est passé du modèle semi-empirique d'une «masse d'air isolée» à des modèles généraux de la circulation mondiale. Ces derniers tiennent compte de l'extrême complexité des processus atmosphériques responsables de la formation des précipitations à différentes échelles de temps et d'espace. Des études récentes ont cherché à incorporer les cycles isotopiques dans ces modèles généraux et ont confirmé l'utilité de la base de données AIEA/OMM pour vérifier ces modèles et les perfectionner.

La déforestation sauvage aura pour effet de modifier le bilan hydrique régional en réduisant l'apport de l'évapotranspiration à l'atmosphère. La situation est particulièrement critique dans le bassin amazonien. La densité de la végétation et les températures relativement élevées de l'air en surface font que la «pompe à eau biologique» a un excellent rendement et restitue à l'atmosphère la majeure partie de l'eau des précipitations. Le modèle isotopique régional du transport de la vapeur d'eau dans l'atmosphère du bassin (fondé sur l'étude antérieure de données isotopiques relatives aux précipitations) montre que près de la moitié de l'eau des précipitations qui tombent sur le bassin est recyclée (figure 1). Des données plus récentes semblent bien le confirmer. De ce fait, le cycle hydrologique devient sensible à la déforestation: le rendement de la pompe biologique va baisser, le ruissellement vers les cours d'eau va augmenter et les températures locales vont monter.

Pour essayer de mieux comprendre les phénomènes de transport de la vapeur d'eau en Amazonie, les spécialistes ont organisé, dans le cadre du projet brésilien, un réseau spécial de stations de prélèvement d'échantillons des précipitations en vue de leur analyse isotopique. Les résultats ainsi obtenus, complétés par ceux de l'analyse isotopique de la vapeur d'eau, devraient permettre d'élaborer un modèle plus complet du mouvement de l'humidité atmosphérique dans la région. Il est particulièrement intéressant de disposer de modèles réalistes de la circulation atmosphérique et du transport de la vapeur d'eau, étant donné les conséquences que la destruction de la forêt amazonienne pourrait avoir dans la région et dans le monde.

Si la déforestation provoque une réduction de la quantité d'eau restituée à l'atmosphère, il est probable que ses effets varieront en fonction de la superficie déboisée. On n'a pas une connaissance précise du bilan hydrique

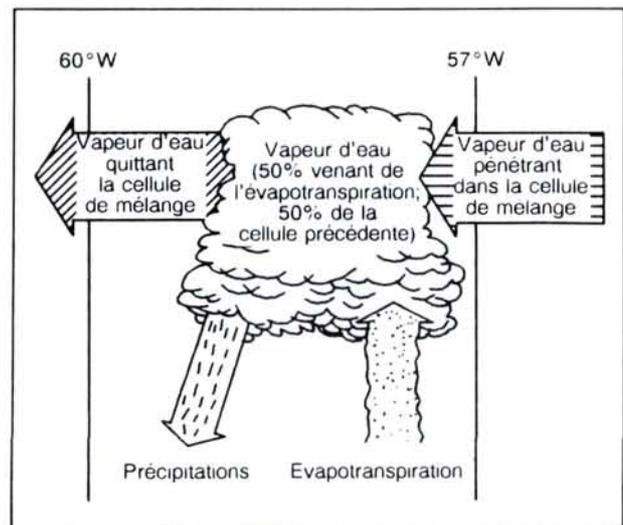
des masses forestières ou des clairières adjacentes en fonction de leur superficie. Toutefois, les études faites dans le cadre du projet brésilien, notamment les relevés humidimétriques neutroniques et les études de micro-météorologie et de physiologie végétale, ont révélé que les conditions à la lisière de la forêt ont une influence jusqu'à 100 mètres à l'intérieur de celle-ci, au niveau du sol. On en déduit que, du point de vue météorologique, les effets de la déforestation sont peut-être plus étendus que la superficie effective de la zone déboisée. Le phénomène s'accroîtra au fur et à mesure de la déforestation et de l'accroissement de l'interface entre les zones déboisées et la forêt elle-même.

Parcours des eaux superficielles

Pour mieux comprendre la dynamique du cycle hydrologique du bassin amazonien, il faut aussi mieux connaître le cheminement à moyenne échelle des eaux de surface que collectent le grand fleuve et ses affluents. Les données isotopiques recueillies par les stations du réseau régional et complétées par un examen isotopique systématique, sur toute l'étendue du bassin, des eaux fluviales des veines principales et des plaines de submersion seront certainement très utiles à cet égard. Il devrait être possible, en particulier, de déterminer le rapport quantitatif entre l'eau du lit principal et celle du lit secondaire (plaine de submersion). On devrait aussi pouvoir calculer les taux de transfert entre ces deux grands compartiments, selon les saisons et pour les différents secteurs de la vallée. Les analyses préliminaires semblent indiquer que jusqu'à 30% de l'eau de la veine principale vient de la plaine de submersion.

Mouvement de l'eau dans le sol. Les isotopes de l'environnement fournissent également des données ponctuelles sur le mouvement de l'eau et son stockage dans la zone non saturée. Les études nombreuses qui ont

Figure 1. Schéma simplifié de la formation des précipitations sur le bassin amazonien



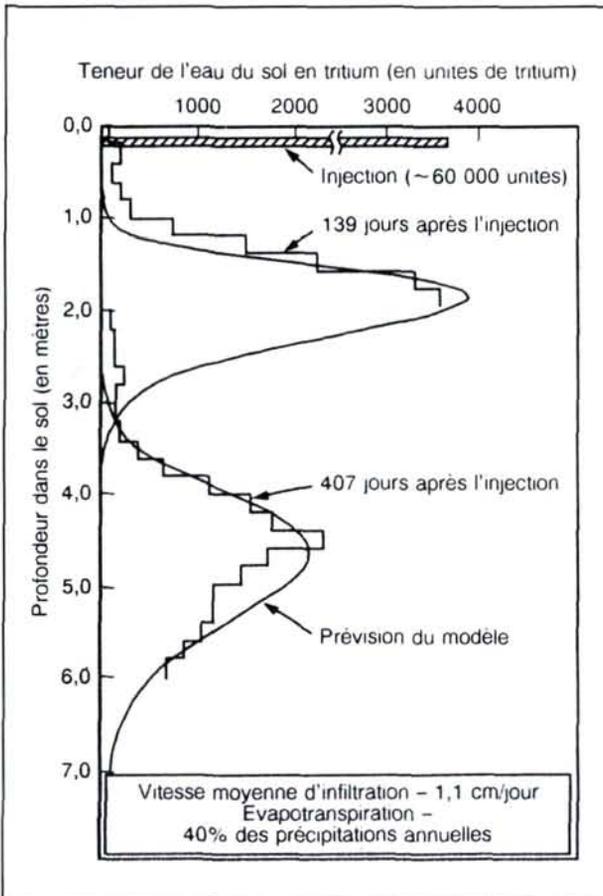
Dans le bassin amazonien, la pluie se forme à partir de deux sources de vapeur d'eau: l'océan Atlantique et la forêt. (D'après les études de la teneur en oxygène 18 et en deutérium des eaux et de la vapeur naturelles, par Salati et col. et Dall'Olio et col.)

été faites révèlent que le tritium est un excellent indicateur du mouvement de l'eau dans cette zone.

Une étude menée dans le cadre du projet brésilien a permis d'évaluer la vitesse moyenne d'infiltration et le flux d'évapotranspiration tant pour la forêt intacte que pour les secteurs déboisés (figure 2). La dynamique de l'eau dans la zone non saturée est déterminée à l'aide des indicateurs isotopiques, tandis que l'eau retenue dans le sol est généralement mesurée par l'humidimètre à neutrons.

Sédimentation. On sait depuis longtemps que l'un des principaux effets du déboisement est l'augmentation de la charge alluviale des cours d'eau. Il est difficile, néanmoins, d'obtenir des données de référence ou de déterminer la variation du taux de sédimentation dans les affluents turbulents de l'Amazonie. L'historique de la sédimentation dans les lacs des lits secondaires du Jamari et du Jiparana qui collectent les eaux de l'Etat de Rondonia fait l'objet d'une étude géochronologique fondée sur l'analyse scintigraphique du plomb 210 et du

Figure 2. Résultats d'une expérience d'infiltration en Amazonie centrale



Le graphique indique les résultats d'une expérience d'infiltration faite près de Manaus (Amazonie centrale) dans le cadre du projet de l'AIEA pour le Brésil. Le tritium injecté a servi d'indicateur du mouvement de l'eau dans la zone non saturée. Des échantillons de sol ont été prélevés 139 et 407 jours après l'injection, afin de mesurer leur teneur en tritium de l'eau contenue. D'après la position de la crête de la courbe de concentration du tritium et compte tenu de la teneur du sol en eau, il a été possible de déterminer la vitesse moyenne d'infiltration et le flux moyen d'évapotranspiration dans la région. Un modèle numérique a été mis au point pour simuler le mouvement de l'eau dans le sol jour par jour.

césium 137 contenus dans des carottes de sédiments. Les résultats pour le petit lac Paca situé sur la plaine de submersion du Jamari indiquent que la sédimentation a décuplé au cours des dix dernières années en corrélation directe avec la déforestation et l'extraction du minerai d'étain (figure 3).

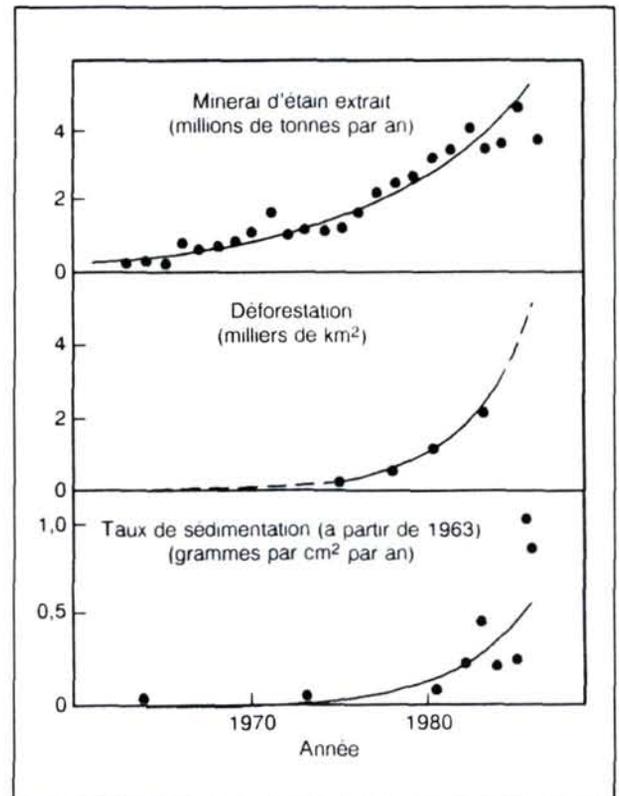
Effets sur la composition du sol

Les phénomènes propres à un site déterminé, de par leur nature, se développent dans l'espace, et leurs effets hors du site sont proportionnels à la superficie de celui-ci. La fertilité du sol de la forêt tropicale résulte d'un équilibre parfait mais délicat. Une perturbation majeure, tel le déboisement, modifie la dynamique des ressources du sol en azote, en soufre et en autres éléments nutritifs. Quelle proportion de ces éléments disparaîtra? En restera-t-il assez pour régénérer la forêt initiale? Cela suffira-t-il aux cultures qui s'installeront sur les terres défrichées? Ou est-ce que ces sols tropicaux, comme tant d'autres, évolueront irrémédiablement vers la stérilité? Comment peut-on les amener à s'autorégénérer?

Les méthodes isotopiques, dont certaines sont relativement nouvelles, jouent un rôle important dans les études localisées, dont voici quelques exemples:

- **Renouvellement de la matière organique.** Les variations du rapport isotopique carbone 13/carbone 12

Figure 3. Effets des activités minières et de la déforestation sur le taux de sédimentation



Les études avec le plomb 210 ont montré que la sédimentation dans le lac Paca (Rondonia) est directement liée à la déforestation et à l'extraction hydraulique du minerai d'étain. (Données de Forsberg, Godov et Victoria)

dans la matière organique ont permis de déterminer les contributions respectives de la forêt et des pâturages à la teneur en carbone. En Amazonie, au bout d'un an, la proportion du carbone dérivé des pâturages était de 5% dans la couche superficielle jusqu'à 20 cm de profondeur, alors qu'après deux ans elle atteignait 20%. Environ 40% du carbone dérivé de la forêt avait disparu. En revanche, l'herbe avait remplacé la matière organique disparue dans une assez large mesure.

● *Fixation biologique de l'azote.* La fixation biologique de l'azote est l'un des processus qui permettent au sol de conserver sa teneur en azote, donc sa fertilité. On peut la vérifier par la méthode de l'azote 15, en mesurant aussi l'abondance naturelle de cet isotope dans les plantes.

● *Pertes et disponibilité de l'azote.* La méthode de l'azote 15 est sans égal pour mesurer les quantités d'azote qui passent du sol à l'atmosphère et aux eaux souterraines, ainsi que les quantités disponibles à partir de la matière organique en décomposition. De la même manière, le soufre peut être dosé à l'aide de ses isotopes stables et radioactifs.

Chaînes alimentaires aquatiques

Les variations naturelles des teneurs en isotopes stables du carbone, de l'azote et du soufre permettent de suivre les flux d'énergie le long des chaînes alimentaires aquatiques. En Amazonie, c'est surtout le carbone 13 qui a servi à déterminer les sources d'énergie végétale alimentant les poissons, les alligators et les insectes aquatiques. La découverte la plus surprenante que l'on ait faite à ce jour est que les herbes à carbone moléculaire C_4 , qui représentent plus de la moitié de la production primaire des plaines de submersion amazoniennes, semblent contribuer très peu aux chaînes alimentaires aquatiques. Les données recueillies montrent la très forte prédominance des sources de C_3 dans l'alimentation de 90% des poissons de l'Amazone exploités commercialement.

Polluants

Les polluants sont de types très divers et les méthodes isotopiques contribuent à l'étude de moyens permettant de les éliminer ou de minimiser leurs effets. Le marquage isotopique des produits agrochimiques sert depuis longtemps déjà à étudier le mouvement et la dégradation des pesticides. De puissantes sondes ADN isotopiques sont à l'étude pour surveiller le développement d'organismes destructeurs capables de décomposer les polluants rebelles présents dans le sol.

Dans les pays industriels, la pollution de l'eau par les nitrates due à un usage intensif des engrais est un sujet de graves préoccupations. Une des solutions, qui n'est que partielle, consiste à sélectionner des génotypes de plantes cultivées conservant une bonne productivité tout en ayant besoin de moins d'engrais (ce qui permet de réduire la charge du sol). Certaines variétés de céréales, par exemple, assimilent mieux les engrais azotés que d'autres variétés. L'azote 15 peut jouer un rôle décisif dans l'étude des causes de ce phénomène et aider les sélectionneurs à déterminer les propriétés à conserver.

Les isotopes stables azote 15 et soufre 34 apportent une précieuse contribution à l'étude des effets de la pollution atmosphérique sur les plantes. De même, le carbone 14 et le phosphore 32 sont largement utilisés en physiologie végétale.

Erosion et désertification

Ce sont là deux grands problèmes d'environnement dans le monde entier. La désertification atteint environ six millions d'hectares chaque année. Les isotopes ont souvent leur rôle à jouer dans la mesure de l'érosion; à cette fin, on se fonde par exemple sur les variations de la teneur de la couche superficielle du sol en césium 137 (provenant des retombées radioactives).

Les arbres fixateurs d'azote jouent un rôle capital dans la reconstitution des sols érodés et désertifiés. L'azote 15 est, là encore, indispensable si l'on veut étudier la fixation de cet élément par différentes espèces ou variétés, et connaître les effets des méthodes de culture et autres facteurs. Par ailleurs, le rapport carbone 13/carbone 12 dans les légumineuses arborescentes devrait grandement faciliter la sélection de génotypes pouvant utiliser l'eau du sol avec un bon rendement. Ces questions, parmi d'autres, sont à l'étude dans le cadre du programme de pédologie de la Division mixte FAO/AIEA.

Conséquences probables

Nous venons de voir comment les isotopes peuvent nous aider à étudier l'environnement; ils sont d'une extrême utilité et toutes leurs possibilités n'ont pas encore été exploitées. Nous n'avons pas abordé directement le problème de l'évolution du climat mondial, mais il demeure que l'abattage de la forêt amazonienne, thème central du programme de l'AIEA sur l'environnement, peut avoir de graves conséquences pour notre climat. Il peut en résulter une réduction très sensible de la quantité de chaleur latente transportée vers les régions extérieures à la zone tropicale et une aggravation de l'effet de serre engendré par le rejet dans l'atmosphère d'énormes quantités d'anhydride carbonique et d'autres gaz.

Les modèles climatologiques actuels donnent à penser que la déforestation complète et rapide de l'Amazonie pourrait être irréversible. En effet, le dérèglement du cycle hydrologique régional et la perturbation profonde des relations complexes entre la flore et la faune pourraient en arriver au point où la forêt détruite serait incapable de renaître. Aussi certaines «données de sortie» tirées de divers éléments du modèle amazonien seront-elles d'importantes «données d'entrée» pour les modèles d'évolution climatologique en préparation. Autant pour cet aspect du problème. Quant aux méthodes isotopiques, elles seront d'une grande utilité lorsqu'il s'agira de définir les changements et compenser leurs effets. Deux exemples: l'emploi des isotopes du carbone et de l'azote pour l'étude des modifications de la teneur du sol en matières organiques et l'emploi du rapport carbone 13/carbone 12 pour déterminer les génotypes végétaux qui utilisent l'eau avec un bon rendement, en particulier sous les climats plus secs que l'on prévoit pour de nombreuses régions du monde.