

Demeurez en place pour les Isotopes!

Stéphan Reeb
Département de biologie
Université de Moncton, Canada
© 2008

Dans la série animée *Les Simpson*, l'équipe de baseball de Springfield s'appelle Les Isotopes. Le nom s'explique par le fait que l'équipe est financée par la centrale nucléaire de Springfield – et les isotopes sont souvent des substances radioactives.

Mais qu'est-ce qu'un isotope, en fait? Pour répondre à cette question, il faut se souvenir que les noyaux des atomes de la matière sont composés de deux types de particules : les protons et les neutrons. Les protons ont une charge positive, et leur nombre détermine le nombre d'électrons de charge négative qui orbitent autour du noyau, ce qui détermine comment l'atome réagit chimiquement avec les autres éléments. Les neutrons, quant à eux, n'ont pas de charge, et leur nombre n'a pas autant d'importance en dehors d'assurer une certaine stabilité au noyau.

Ce qui nous amène à la réponse : un isotope est une variante d'un élément qui ne diffère que par le nombre de neutrons dans le noyau de ses atomes. Il peut exister plusieurs différents isotopes d'un même élément : ils ont tous le même nombre de protons dans leur noyau – ce qui définit un élément – mais ils n'ont pas le même nombre de neutrons. Le carbone-12, carbone-13, et carbone-14 en sont des exemples. Le «12» représente les 6 protons et 6 neutrons du noyau, le «13» représente 6 protons et 7 neutrons, et le «14» correspond à 6 protons et 8 neutrons. Les six protons définissent ces trois entités comme étant des isotopes de carbone, et le nombre variable de neutrons différencie chacun des trois isotopes.

Le carbone « ordinaire », de loin le plus abondant en nature, est le carbone-12. Le carbone-13 est rare (il ne représente qu'environ 1 % du carbone total sur terre) et tout comme le carbone-12 il est un isotope dit « stable »; il n'a pas tendance à se désintégrer. Le carbone-14, quant à lui, est encore plus rare (seulement 0.000000001% du carbone total) et il est radioactif : il a tendance à se désintégrer en émettant des radiations. Cependant, la quantité relative de carbone-14 sur terre ne va pas en diminuant au fil du temps, car la perte par désintégration est compensée par un processus de formation à haute altitude (entre 9 et 15 km) par des radiations cosmiques qui transforment quelques-uns des atomes d'azote de

l'air en carbone-14. Ce dernier peut s'associer à l'oxygène au même titre que le carbone normal pour former du CO₂. Sous cette forme le carbone-14 se répartit dans l'atmosphère tout entière et éventuellement entre dans la chaîne alimentaire après avoir été absorbé par les plantes qui font de la photosynthèse. Puisque votre corps se forme à partir des plantes que vous mangez, ou des animaux qui se sont nourris de ces plantes, il y a présentement en vous des atomes de carbone-14, et une partie d'entre eux se désintègrent. Votre corps émet environ 1 millirem de radiations par année à cause de son carbone-14. (C'est une dose très faible car vous contenez très peu de carbone-14, seulement 0.000000001% de votre carbone total, tout comme l'ensemble des organismes vivants et de l'atmosphère – par comparaison, un vol en avion du Nouveau-Brunswick jusqu'en Colombie-Britannique vous expose à 2-5 millirem, et un examen aux rayons X chez le dentiste vous expose à 10-40 millirem; les mêmes radiations cosmiques qui forment le carbone-14 en altitude vous soumettent à 300 millirem de radiations par année).

Bien qu'on associe souvent les isotopes avec le phénomène de la radioactivité, il est bon de se rappeler qu'il existe aussi des isotopes stables. En fait, environ 80% des isotopes retrouvés naturellement sur terre sont stables. Mais qu'ils soient stables ou radioactifs, tous les isotopes sont détectables par des appareils spéciaux tels que les spectromètres de masse. Les isotopes radioactifs, de plus, peuvent être détectés par des compteurs de radiations. Ces appareils permettent toutes sortes d'applications intéressantes en science. La suite de cet article en présente quelques-unes.

Datation isotopique

Une caractéristique des isotopes radioactifs est qu'ils se désintègrent à un taux proportionnel à leur quantité. Ils ont une « demi-vie » : après une certaine période de temps x (qui varie d'un isotope à l'autre), la moitié des isotopes se seront désintégrés, et après une durée x supplémentaire, la moitié de ceux qui restaient (donc, le quart de la quantité originale) se seront désintégrés eux aussi, et ainsi de suite. Il y a donc une relation entre le temps et la quantité d'isotopes radioactifs présents dans un échantillon de matière. Cela permet de déterminer l'âge de cet échantillon.

La datation au carbone-14 fonctionne selon le principe suivant. Tant et aussi longtemps qu'un organisme est vivant, il mange, et donc la proportion de carbone-14 dans son corps reste la même que dans l'environnement en général, soit 0.000000001% du carbone total (ce qui émet 450 rayons bêta par minute par once de carbone total). C'est une petite quantité, certes, mais mesurable avec les appareils. Mais lorsque l'organisme meurt (par exemple, lorsque le lin – une plante – est coupé pour en faire un vêtement), le carbone-14 n'est plus renouvelé et donc sa quantité relative commence à baisser à mesure qu'il se désintègre. Sachant que le carbone-14

a une demi-vie de 5730 ans, on peut calculer depuis combien de temps la plante est morte (depuis combien de temps le vêtement existe) en mesurant le nombre de rayons bêta émis par minute par once de carbone total. C'est grâce à cette technique qu'on a confirmé, par exemple, que le fameux Suaire de Turin, présumé comme étant le linceul qui a entouré le corps de Jésus Christ après sa mort, ne pouvait pas l'être puisqu'il n'était vieux que de 900 ans tout au plus.

C'est aussi grâce aux isotopes radioactifs – ceux qui ont une demi-vie particulièrement longue, comme certains isotopes d'uranium et de potassium – que l'on peut établir l'âge des fossiles (ou plus précisément, l'âge des couches rocheuses dans lesquelles les fossiles se trouvent) vieux de plusieurs millions d'années.

Mais la datation n'a pas besoin d'être toujours fondée sur les isotopes radioactifs et leur demi-vie. Voici un exemple de datation avec un isotope stable. Notre planète est constamment bombardée par des rayons cosmiques – des particules (électrons, hypérons, mésons, neutrons, nucléons) en provenance de l'espace interstellaire de notre galaxie. Ceci nous expose à une irradiation qui est beaucoup trop faible pour nuire à notre santé. Mais cette même irradiation – en plus de former le carbone-14 dans la haute atmosphère, tel que mentionné ci-haut – affecte quand même légèrement les roches autour de nous. Elle finit par provoquer la formation de néon-21, un isotope stable qui reste emprisonné dans la roche. Plus il y a de néon-21 dans une roche, le plus longtemps que cette roche a dû être exposée aux rayons cosmiques à la surface de la terre.

Pour qu'une roche demeure en surface, il ne faut pas qu'il y ait d'érosion, et donc pas de pluie. Présentement, l'endroit le plus sec au monde est le désert d'Atacama dans le nord du Chili. Grâce à des mesures de néon-21, un groupe de géologues sous la direction du professeur Tibor Dunai a établi que les roches de ce désert sont demeurées exposées à la surface pendant plus de 23 millions d'années. Ceci est un record qui fait du désert d'Atacama le plus vieil endroit sur terre à n'avoir subi aucune modification de son paysage au fil du temps. ¹

Marquage isotopique

En exposant des atomes « ordinaires » à des radiations, il est possible de former certains isotopes, et par certaines réactions il est possible d'intégrer ces isotopes à des molécules. Les molécules deviennent ainsi marquées par la présence d'un isotope inhabituel. On peut donc, par exemple, déterminer où et quand dans le corps une certaine substance est utilisée. On peut ainsi marquer des molécules de glucose avec du deutérium

¹ Geology 33 : 321-324, 2005

(un isotope de l'hydrogène), et déterminer quelle partie du cerveau entre en fonction (consomme du glucose comme source d'énergie) lors d'une certaine activité.

Plusieurs hôpitaux ont des départements de médecine nucléaire qui font appel à l'utilisation d'isotopes comme marqueurs dans divers tests diagnostiques. À la fin de 2007, la centrale nucléaire de Chalk River en Ontario fut temporairement fermée pour ne pas avoir installé un dispositif de sécurité demandé par la Commission Canadienne de Sûreté Nucléaire, et cela a causé une crise dans le monde médical puisque cette centrale, vieille de 50 ans il faut bien le dire, fournissait plus de la moitié des isotopes radioactifs utilisés en médecine dans le monde entier. On estime que plus de 75,000 tests médicaux étaient effectués à chaque jour dans le monde à l'aide d'isotopes fournis par cette centrale.

Signature isotopique

Un os peut demeurer intact pendant des milliers d'années avant de se fossiliser. Pendant tout ce temps, l'os contient les mêmes isotopes qu'il avait lorsqu'il remplissait ses fonctions dans le corps vivant de son propriétaire d'origine. Or, la nature et la quantité de ces isotopes sont influencées par ce que l'animal, ou la personne, mange. Les anthropologues qui ont la chance de trouver de vieux ossements peuvent donc se faire une idée du régime alimentaire de sociétés anciennes en analysant le contenu en isotopes de ces os.

Par exemple, l'anthropologue Ekaterina Pechenkina, de la City University à New York, a analysé les squelettes de fermiers chinois qui vivaient près du fleuve Jaune il y a 4000-7000 ans. Elle a aussi étudié les os des animaux de leurs fermes. En mesurant les proportions relatives de carbone-13 et d'azote-15, elle a pu déterminer que les fermiers se nourrissaient à partir d'une céréale bien particulière, le mil. De plus, les porcs de la ferme se nourrissaient eux aussi de mil.²

Donner des céréales à un porc plutôt que de les consommer soi-même directement est un luxe que seule une société agricole bien productive peut se payer. On peut aussi supposer que les porcs en question étaient bien engraisés. Peut-être que les villageois chinois aimaient organiser des méchouis il y a déjà 4000 ans?

Les poils d'un mammifère et les plumes d'un oiseau ont aussi un contenu isotopique qui varie en fonction de ce que l'animal mange. Dans le cas du renard de l'Arctique, un poil prélevé au printemps nous renseignera sur ce que l'animal a mangé pendant l'hiver, tandis qu'un poil à l'automne

² Journal of Anthropological Science 32 : 1176-1189, 2005

reflète le régime alimentaire de l'été. La proportion relative de carbone-12 et de carbone-13 dans les poils indique si la nourriture du renard est surtout d'origine terrestre ou marine – les organismes marins contiennent relativement plus de carbone-13. L'écologiste James Roth a ainsi trouvé que les renards se nourrissent plus à partir de la mer pendant l'hiver que pendant l'été.³ Ce sont en fait les ours polaires qui font lien entre la mer et les renards : les ours attrapent des phoques (créatures surtout marines), en délaissent éventuellement les carcasses, dont les restants font quand même l'affaire des petits renards. En été, les renards capturent eux-mêmes leurs propres proies, habituellement des lemmings (petits rongeurs terrestres).

En été, les renards se font aussi des omelettes. Ils volent des œufs dans les colonies de grandes oies des neiges – on a déjà vu un renard particulièrement diligent subtiliser plus de 2000 œufs en une saison. Plusieurs de ces œufs sont consommés immédiatement, mais la plupart sont enterrés par les renards pour faire état de réserve en prévision de temps plus durs. La question se pose alors : combien de temps ces œufs restent-ils comestibles? Quelle est leur date d'expiration? Cette fois-ci, c'est en prenant des échantillons de sang dans les renards et en y mesurant les proportions de carbone-13 et d'azote-15 qu'on a pu trouver la réponse. L'écologiste Gustaf Samelius et ses collègues de l'Université de la Saskatchewan ont en effet trouvé que même au printemps suivant, les renards portaient dans leur sang les signes isotopiques qu'ils se régalaient encore d'œufs (même si les oies, migratrices, n'étaient pas encore arrivées).⁴

Bien entendu, le gel préserve les œufs en hiver, mais il est plus surprenant de constater que les œufs ne pourrissent ni en automne ni au printemps. Les membranes qui recouvrent le blanc d'œuf, et des protéines spéciales dans ce même blanc, semblent bien protéger les petits snacks du renard.

Les études ci-haut font appel au concept de « signature isotopique ». Il s'agit de la notion que les proportions relatives de divers isotopes peuvent identifier la provenance d'un objet. De nos jours on se sert des signatures isotopiques dans des domaines aussi variés que les enquêtes de scène de crime (pour trouver l'origine d'un poil de tapis, disons), la paléontologie (par exemple, on peut se faire une idée de la salinité et de la température de l'eau dans laquelle des coraux ou autres organismes calcaires ont vécu il y a des millions d'année), ou bien les études environnementales (on a ainsi pu déterminer l'étendue géographique des retombées nucléaires après l'accident de Tchernobyl, et on peut mesurer, à partir du contenu isotopique des plantes, l'étendue de la pollution suite à l'utilisation d'hydrocarbures dans les pays industrialisés).

³ *Oecologia* 133 : 70-77, 2002

⁴ *Journal of Animal Ecology* 76 : 873-880, 2007

Mot de la fin

Les amateurs de racines grecques devineront peut-être le double entendre du titre du présent article. « Isotope » vient d'un mot grec qui veut dire « à la même place ». Cela fait référence au fait que les isotopes d'un élément occupent tous la même place dans le tableau périodique, à savoir la place de l'élément lui-même.