

Détecteurs étonnants et banals

ROBERT FLEISCHER

On mesure les doses de rayonnements reçues dans le passé par le corps humain en dénombrant les traces laissées par des particules dans certains objets très ordinaires comme des presse-papiers, des lunettes ou des CD.

Le 30 septembre 1999, des techniciens d'une société de traitement des combustibles nucléaires à Tokaimura laissent une solution d'uranium atteindre la masse critique. La réaction nucléaire en chaîne qui en résulte déverse un flot de rayons gamma et de neutrons : trois employés sont hospitalisés. Par chance, le reste du personnel a été exposé à des doses beaucoup plus faibles, inférieures à la limite annuelle autorisée. Cela signifie-t-il que ces personnes n'ont aucune raison de se faire du souci ? Quelle quantité de rayonnements peut-on recevoir sans risque ?

Le danger dépend du type de rayonnement, mais aussi de la nature des tissus exposés, de l'âge et des prédispositions génétiques du sujet. Toutefois, même si l'on connaissait tous ces facteurs, il serait difficile de calculer le risque à partir des principes de base de la physique et de la biologie. Aussi est-il très délicat de fixer les normes réglementaires pour l'exposition aux radiations et d'évaluer le risque des petites doses.

Les données provenant des habitants d'Hiroshima sont les plus pertinentes pour mesurer les méfaits des neutrons, car la bombe à uranium qui y a été lâchée a libéré une proportion de neutrons bien plus importante que le modèle au plutonium, testé pour la première fois à Alamogordo, au Nouveau-Mexique, et utilisé sur Nagasaki : la bombe d'Hiroshima fut unique, aucune autre du même type n'a été testée, ni même construite. Nous ne disposons donc d'aucune mesure des effets du rayonnement neutronique et les physiciens doivent estimer les doses reçues par les victimes, le 6 août 1945, jour où l'ère atomique faisait son entrée foudroyante dans la mauvaise conscience collective.

Un des pionniers de ces mesures fut Sakae Shimizu, physicien à l'Université de Kyoto, l'un des premiers scientifiques à visiter la cité dévastée. Comme il n'existait évidemment pas de détecteur, il se demanda quelles substances avaient été transformées par le rayonnement. Le perspicace Shimizu recueillit des échantillons du soufre, élément qui était utilisé à l'époque pour monter des isolateurs en verre sur les poteaux électriques. Il avait compris que les neutrons libérés par la bombe avaient converti une partie du soufre 34 en soufre 35 radioactif, et il utilisait l'émission radioactive du soufre 35 pour estimer l'intensité de l'irradiation. Shimizu a travaillé assez vite pour faire les mesures appropriées (la demi-vie du soufre 35 est de 87 jours). Hélas, un officier américain confisqua ces mesures et elles furent perdues.

Shimizu et de nombreux autres chercheurs ont évalué le rayonnement neutronique de l'explosion d'Hiroshima par des moyens radiochimiques et des calculs théoriques, mais les données étaient incompatibles : les résultats radiochi-

miques différaient des calculs d'un facteur cinq. Que faire ? Par chance des matériaux communs sont des détecteurs de radiations, car ils gardent les traces du passage des particules qui les traversent. La possibilité d'utiliser de tels enregistrements pour mesurer le rayonnement est un très bon exemple de sérendipité.

La recherche des traces

Il y a une quinzaine d'années, j'ai découvert que le verre ordinaire pouvait servir de dosimètre à Hiroshima. Dans la plupart des isolants et dans certains autres solides, le passage des particules rapides crée des zones de désordre cristallin ; ces zones sont détectables, car elles se dissolvent avant le reste du cristal dans des liquides corrosifs. L'immersion dans un acide fort ou une base forte élargit assez les minuscules traces de particules pour qu'elles puissent être vues et étudiées à l'aide de microscopes ordinaires (certaines sont même visibles à l'œil nu). Leur forme est variée, allant de puits coniques à des tunnels de section quasiment uniforme.

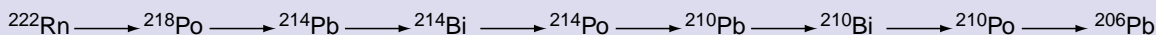
De telles traces apparaissent quand l'intensité de la perturbation dépasse un seuil, spécifique de chaque substrat. Au-dessus de ce seuil, l'efficacité de l'attaque chimique le long de la trace augmente avec l'intensité des dégâts causés par la particule lors de son passage. Ces propriétés offrent de nombreuses et intéressantes applications pratiques et la dosimétrie rétrospective des neutrons dans le verre est l'une des plus récentes.

En réalité, les neutrons eux-mêmes ne laissent pas de traces, mais leur passage est repérable. Pourquoi ? Parce que le verre contient généralement de l'uranium à l'état de traces, et quand un noyau d'uranium est frappé par un neutron, il peut se casser. Les fragments nucléaires ainsi produits ont une énergie considérable et créent des traces en se déplaçant dans le verre. Ce phénomène est utilisé depuis longtemps pour mesurer le rayonnement neutronique dans les réacteurs nucléaires. La plupart de ces traces résultent de la fission de l'isotope 235 de l'uranium induite par des neutrons lents.

Quand j'ai proposé cette technique pour détecter le flux de neutrons lors de l'explosion d'Hiroshima, il me fallait obtenir des échantillons de verre adéquats : ce fut difficile. En 1994,

1. LES RAYONS COSMIQUES LAISSENT DES TRACES sur le casque en plastique utilisé par les astronautes qui ont « marché sur la Lune » et sur une pièce utilisée pour une expérience de biologie durant le vol *Apollo 14*. Les traces ont permis des mesures des doses de radiation. Les traces coniques sur la pièce (*indiquées par les flèches*) dans le plastique ont, après décapage, environ un millimètre de long.





j'ai écrit à une trentaine de scientifiques japonais pour leur demander des morceaux de verre. Hélas, les verres qu'ils m'ont envoyés étaient, soit trop éloignés de l'impact pour avoir enregistré des neutrons, soit avaient été fondus lors de la déflagration et les traces avaient été effacées. Heureusement, un de mes collègues japonais, Shoichiro Fujita, me donna un presse-papiers en verre détérré à deux cents mètres du point zéro lors de travaux de terrassement.

Avec S. Fujita et Masaharu Hoshi (de l'Université d'Hiroshima), j'ai déterminé la dose de neutrons que ce morceau de verre avait reçue. J'ai traité une portion de la surface avec un acide fort et j'ai examiné sous un microscope de grossissement 500 environ 4 centimètres carrés, scannant en tout environ 10 000 champs visuels. Au prix d'une grande fatigue oculaire, j'ai dénombré 28 traces de sites où les neutrons ralentis, issus de la terrible explosion, avaient frappé les noyaux d'uranium du verre et à leur tour causé des réactions de fission. Pour déterminer la quantité totale de traces d'uranium créées dans le verre, nous l'avons soumis, dans un réacteur, à un flux connu de neutrons et nous avons compté les traces nouvellement formées. En combinant ces observations, nous avons calculé la dose de neutrons reçue en 1945.

Un doute subsistait : les traces créées un demi-siècle auparavant n'auraient-elles pas disparu avec le temps ? Nous avons donc comparé la taille des anciennes traces et celles que nous venions de faire. Comme leur diamètre ne différait pas de façon marquée, nous avons été rassurés : l'effacement des traces n'était pas un facteur important. Mais il se posait une autre question clef, plus difficile à aborder quantitativement : l'échantillon était-il protégé des neutrons au moment de l'explosion ? Dans une certaine mesure, certainement, sinon le presse-papiers aurait été tellement chauffé que les traces auraient disparu ; toutefois le verre lui-même ne renfermait aucun autre indice sur son emplacement au moment du souffle. Avec mes collègues japonais, nous avons estimé la protection offerte par les murs des habitations de 1945, là où l'objet fut mis au jour et nous en avons conclu qu'un objet exposé là où se trouvait le morceau avait reçu $1,5 \times 10^{12}$ neutrons par centimètre carré, valeur légèrement inférieure aux calculs pour une telle distance du point d'impact, mais cohérente avec les mesures radiochimiques.

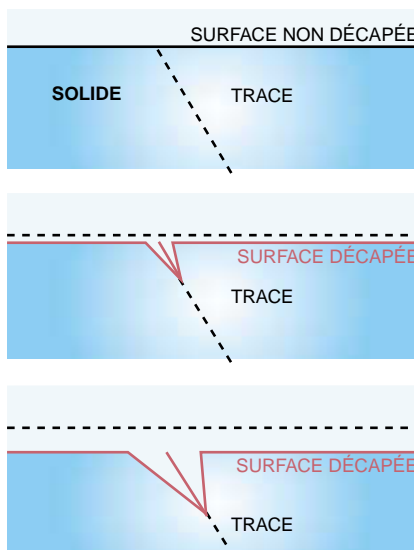
Plus récemment, J. MacDonald, S. Fujita, M. Hoshi et moi-même avons trouvé des traces laissées dans la glaçure de deux tessons de porcelaine retrouvés dans la même zone (la glaçure de la porcelaine est la fine couche externe vitreuse). Les doses mesurées y sont respectivement de 3×10^{12} et de $1,1 \times 10^{13}$ neutrons par centimètre carré. La plus élevée de ces trois valeurs dépasse à la fois celles des calculs théoriques et les résultats radiochimiques précédents et il est fort probable qu'elle résulte d'une protection moindre. Ces résultats sont importants pour fixer des normes : si les pathologies liées au rayonnement observé à Hiroshima sont le fait d'une quantité de neutrons supérieure à ce que nous pensions, les neutrons sont moins dangereux que ne le pensent les experts.

Notre analyse de cet objet de verre provenant d'Hiroshima contribue directement à l'établissement de normes de sécurité pour les neutrons, mais ce résultat ne concerne pratiquement que les travailleurs de l'industrie nucléaire. Or la dosimétrie rétrospective a une portée beaucoup plus large : la protection du public contre le radon, une source de radiations naturelle et omniprésente.

Le radon, à travers ses produits de désintégration, est une des principales sources de cancer du poumon chez les mineurs de fond. Le risque pour les mineurs est bien documenté par de nombreuses études, mais la relation entre la dose de radon et la probabilité d'être atteints d'un cancer du poumon est encore à démontrer pour les faibles expositions. Les deux études les plus complètes (de R. Field à l'Université de l'Iowa, et B. Cohen à l'Université de Pittsburgh) sont en désaccord. Des mesures complémentaires de l'exposition au radon à l'intérieur des maisons nous aideraient à trancher.

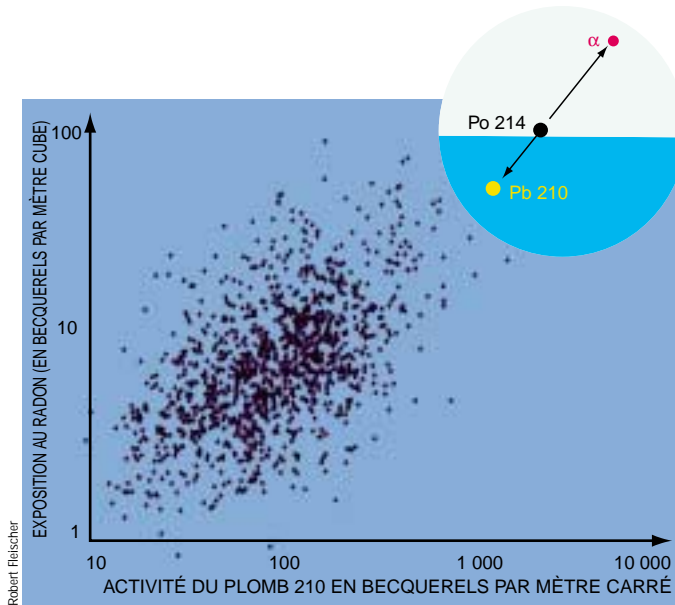
Problèmes de sécurité intérieure

Que faudrait-il mesurer au juste ? L'expression « dangers du radon » est impropre, les véritables coupables sont ses produits de désintégration : le polonium 218, le plomb 214, le bismuth 214 et le polonium 214, tous quatre de demi-vie inférieure à 30 minutes. Lorsque vous respirez de l'air contenant du radon, une petite fraction de ce gaz se désintègre dans vos poumons avant que vous ne l'expiriez, mais vous respirez également des produits de désintégration radioactifs du radon,



2. LE PASSAGE DES PARTICULES CASSE LES CHAÎNES de polymère d'un plastique, formant un étroit couloir (ligne rouge, à gauche). En traitant avec une base forte, on attaque le matériau le long de cette

trace (ligne oblique en pointillés), laissant un trou conique (au centre). Le trou (à droite) de un millimètre de long dans du polycarbonate Lexan embarqué à bord d'Apollon 14 reflète le passage d'un noyau d'argon.



3. LES ÉVALUATIONS RÉTROSPECTIVES du radon de l'air sont déterminées par la quantité de plomb 210 dans le verre. Ce plomb est issu de la désintégration radioactive du polonium 214, lui-même résultant des désintégrations du radon 222. Quand un atome de polonium 214 libère dans l'air une particule alpha, la force de recul enchâsse le noyau de plomb dans le verre, à environ 25 nanomètres de profondeur.

soit sous forme d'atomes libres, soit sur des aérosols. Ces matériaux s'accrochent au tissu des poumons et la plupart s'y désintègrent avant d'être évacués.

Il serait donc judicieux de mesurer les véritables coupables, c'est-à-dire les quatre produits de désintégration qui menacent directement la santé. Malheureusement, une telle mesure est délicate, car il faut un système de pompage pour récolter, séparer et mesurer les différents isotopes radioactifs. La récolte passive comporte son lot d'incertitudes : un meuble situé à proximité de la zone d'échantillonnage réduit la concentration des produits de désintégration dans l'air ambiant.

Ainsi ignore-t-on habituellement les produits de désintégration, et on mesure le radon, spécifiquement l'isotope 222, en estimant que l'air de la plupart des maisons contient à peu près la moitié des produits de désintégration qui seraient présents en atmosphère close. La concentration en radon est facile à mesurer et l'erreur commise quant à la quantité de ses produits de désintégration présents dans l'air est inférieure à celle résultant des mesures directes de ces produits.

La véritable difficulté vient de ce que la concentration en radon dans une maison varie dans le temps. Quand il fait beau et que les fenêtres restent ouvertes, les concentrations en radon sont faibles. Inversement, le radon s'accumule quand les occupants sont en vacances et que la maison est hermétiquement fermée. Il n'est techniquement pas difficile de mesurer la concentration moyenne en radon sur une longue période, mais la tâche exige de la persévérance.

Pour cette raison, les épidémiologistes cherchent à mesurer les niveaux passés de radon dans les maisons. Une technique prometteuse fait intervenir le plomb 210, un produit de seconde génération du radon, issu du polonium 214. Le plomb 210 est aussi radioactif, mais sa demi-vie plus longue – 22 ans – fait qu'il subsiste assez longtemps pour constituer un bon mouchard de décennies d'exposition au radon. Toutefois, le problème est qu'une bonne partie du plomb 210 produite à l'intérieur d'une maison est balayée vers l'extérieur ou disparaît à coups d'aspirateur ou de serpillière.

La dosimétrie rétrospective est néanmoins possible, car, dans la plupart des résidences, le plomb 210 s'accumule à la

4. CE PRESSE-PAPIERS EN VERRE retrouvé près du point zéro de l'explosion atomique d'Hiroshima a gardé trace de la quantité de rayonnement neutronique libérée par l'explosion. Après examen au microscope, l'auteur a trouvé 28 traces de particules attaquées qui, combinées à un calibrage moderne réalisé à l'aide des neutrons d'un réacteur, ont fourni une estimation de la dose de neutrons reçue par cet objet.

surface des objets en verre, ou juste sous leur surface. Le processus commence quand un atome de polonium radioactif se dépose sur un morceau de verre, par exemple le verre d'un cadre photo, un miroir ou une vitre. Quand cet atome se désintègre, il libère une particule alpha énergétique (constituée de deux protons et de deux neutrons) et se transforme en atome de plomb 210. Si la particule alpha est propulsée dans l'air, l'énergie de recul est suffisante pour enchâsser le plomb à 25 nanomètres dans le verre (une profondeur égale à 100 noyaux atomiques). Il est alors à l'abri, ne risque plus d'être emporté par le chiffon à poussière, et peut être mesuré en plaçant une bande de plastique contre le verre (les particules alpha émises par le polonium 210, descendant de seconde génération du plomb 210, laissent des traces dont le décompte mesure la teneur en plomb 210). L'autre chiffre pertinent (la durée pendant laquelle le verre a été exposé) doit également être évalué : pour les vitres, cette durée coïncide généralement avec l'âge de la maison, en revanche, le verre devant une peinture peut avoir enregistré les traces de radon depuis fort longtemps.

De nombreux chercheurs ont mesuré le plomb 210 dans 1 000 endroits et 500 foyers ; ils ont aussi mesuré la concentration dans ces maisons par les techniques classiques. Leur étude fait apparaître une nette corrélation entre les niveaux de radon mesurés et le plomb 210 sur les surfaces vitreuses, mais la dispersion des données est d'environ 10.

Pour progresser, nous avons étudié les sources d'erreurs possibles et les moyens de les réduire. Un des problèmes est le lessivage du plomb 210 lors du nettoyage qui donne des taux de radon inférieurs à la valeur réelle. Une autre complication est la formation d'une couche d'hydratation, c'est-à-dire une mince strate d'altération chimique à la surface du verre : la diffusion facile du plomb 210 à travers une couche d'hydratation poreuse donne à toute mesure rétrospective du radon une valeur trop basse.

Ces biais peuvent être minimisés en éliminant des mesures les verres à trop faible teneur en oxyde d'aluminium, un composant qui ralentit la diffusion. Cependant, même si cette source d'erreur peut être prise en compte, il est presque

certain que nous ne parviendrons pas à éliminer toutes les incertitudes, car le dépôt des produits de désintégration sur les surfaces dépend beaucoup des courants d'air, très variables.

Les radiations tenues à l'œil

Les épidémiologistes du cancer veulent utiliser la technique du plomb 210 enchâssé pour mesurer les niveaux de radon dans les maisons, mais ils voudraient surtout déterminer l'exposition d'une personne tout au long de la journée, à son domicile, lors des trajets et au travail. Ce sera peut-être bientôt possible, car des chercheurs ont récemment mis au point un nouveau détecteur de l'exposition au radon... en regardant pas plus loin que le bout de leur nez.

La plupart des lunettes fabriquées aux États-Unis sont en CR-39 (allyl diglycol carbonate), un plastique qui enregistre avec fiabilité le passage des particules alpha. Le comptage des traces cumulées de particules alpha, issues du radon ou de ses produits de désintégration, constitue donc un moyen de mesurer l'exposition du porteur aux produits cancérogènes. Ce détecteur individuel s'ajuste automatiquement à l'air respiré par le possesseur de lunettes dans les différents endroits qu'il fréquente au fil du temps... jusqu'au moment où il change de lunettes.

Notre idée, très simple en principe, consiste à mesurer les traces de particules et à en déduire l'exposition au radon, mais c'est un des nombreux cas où le passage à la pratique présente des complications. Par exemple, le CR-39 ne réagit pas au radon de la même manière selon sa fabrication et l'historique d'une paire donnée de verres de lunettes est en général inaccessible. Par conséquent, le calibrage d'un jeu de verres doit être déterminé pour chaque spécimen. Dans nos essais, nous avons mesuré les sensibilités relatives en exposant une partie de chaque verre à une dose standard de particules alpha, puis en comptant les nouvelles traces. Nous avons également effectué un certain nombre de calibrages absolus, en soumettant des verres à des concentrations connues de radon dans des chambres closes.

Cette difficulté n'est pas la seule : les produits de désintégration du radon ne se déposent pas uniformément sur la surface du verre de lunettes ! Nous avons minimisé ces effets déconcertants en comptant les traces sur la surface intérieure du verre : dans cette région abritée, les produits de désintégration du radon se déplacent par diffusion, ce qui donne des résultats plus reproductibles. De plus, la face interne du verre est taillée et polie juste avant usage, ce qui revient à remettre le dosimètre à zéro ; comme la plupart des verres sont fabriqués sur ordonnance d'un ophtalmologiste, on sait avec précision quand les verres ont été préparés et le temps total d'exposition est connu.

Jusqu'à présent, nous avons testé cette méthode sur une vingtaine de paires de lunettes. La plupart de nos résultats font apparaître des valeurs peu spectaculaires pour la concentration moyenne de radon (en dessous de trois picocuries par litre, ce qui équivaut encore à 110 becquerels par mètre cube, typique d'un air confiné). Une paire de lunettes se détachait nettement du lot : elle indiquait 175 picocuries par litre, soit plus de 40 fois le «niveau d'intervention» de l'Agence américaine de protection de l'environnement. Ces lunettes avaient été portées par une des personnes responsables de l'exploitation de la *Free Enterprise Radon Health Mine*, dans le Montana, un établissement qui vante les vertus thérapeutiques de son air riche

en radon pour le traitement de toutes sortes de maladies, allant de l'arthrite à la goutte, l'emphysème, ou les problèmes dermatologiques.

Bien sûr, ce n'était pas par hasard que nous avons été chercher cette paire de lunettes. Nous avons été la chercher spécialement pour tester notre méthode, sachant que la concentration moyenne du radon dans cette mine était d'environ 1300 picocuries par litre. Dans le bureau de la *Free Enterprise*, la concentration moyenne est de 500 picocuries par litre. La propriétaire de ces lunettes a déclaré qu'elle passait environ 175 heures par an dans la mine et environ 2400 à 3000 heures au bureau. La moyenne personnelle que nous avons mesurée sur ses lunettes, pour élevée qu'elle était, pouvait facilement s'expliquer par son exposition à ces deux seules sources. Signalons au passage que sa famille exploite la mine depuis plusieurs années, et que, par extraordinaire, personne n'a été atteint de cancer des poumons : les propriétaires possèdent apparemment les bons gènes pour gérer un tel établissement.

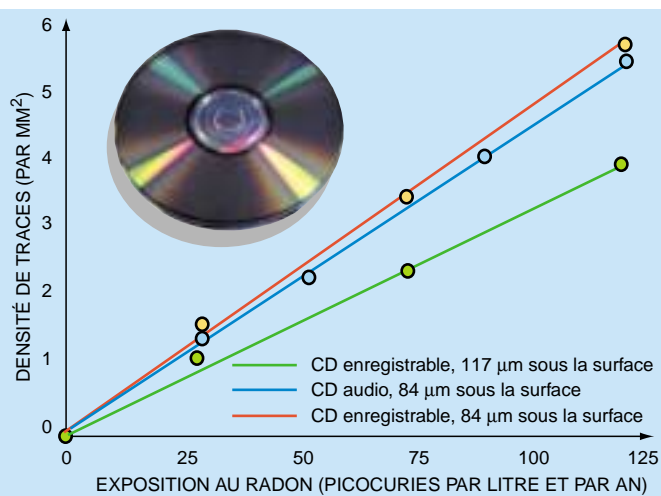
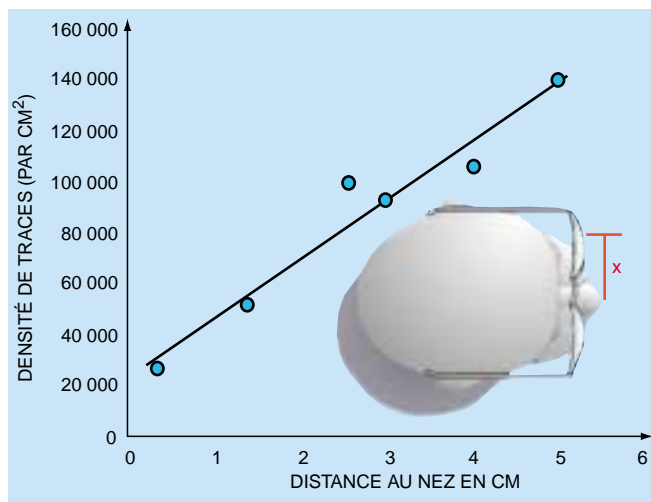
Un détecteur compact

Nos travaux préliminaires nous permettent d'espérer que le comptage des traces gravées sur les verres de lunettes constituera bientôt un moyen précis pour déterminer les expositions individuelles au radon. D'autres objets en plastique peuvent également faire l'affaire. Une possibilité intéressante est celle des disques compacts, constitués de polycarbonate, un plastique qui, à l'instar du CR-39, est un détecteur alpha (beaucoup moins sensible néanmoins). Le radon étant soluble dans le polycarbonate, l'intérieur d'un CD contient un enregistrement de l'exposition au radon à long terme dans son lieu de stockage.

Dobromir Pressyanov, de l'Université St. Kliment Ohridski de Sofia, en Bulgarie, et Jozef Buysse, Annick van Deynse, André Poffijn et Geert Meesen, de l'Université de Gand en Belgique, ont récemment exploré cette technique, mesurant la densité des traces dans des CD en fonction de la concentration en radon à laquelle ils étaient soumis.

Leurs résultats ont montré une corrélation remarquablement bonne. Un des avantages de la méthode par rapport aux lunettes est que les produits de désintégration sont immobilisés dans le plastique. Ainsi, le décompte des traces formées sous la surface du CD rapporté à son âge mesure directement la concentration en radon, sans avoir à se demander si tous les produits de désintégration radioactifs étaient bien dans les parages et ont laissé des traces. Le fait que les CD soient généralement conservés dans des boîtes est sans importance, à moins qu'elles soient hermétiques au radon. Le principal défaut des CD est le faible taux d'accumulation des traces : il ne se grave en un an que quelques traces par centimètre carré.

La détection des traces dans le verre d'Hiroshima est une méthode héroïque que nul ne veut pratiquer de façon routinière. Le comptage de telles traces requiert normalement une gravure électrochimique, technique où l'on soumet l'objet à une forte tension électrique tandis qu'il est immergé dans un électrolyte : les décharges électriques qui en résultent agrandissent les traces, mais les déforment, ce qui augmente le risque de confondre les défauts du plastique avec des traces. Peut-être pourrions-nous établir des procédures permettant de surmonter cet obstacle et utiliser systématiquement le comptage des traces de particules dans les CD.



5. LES VERRES DE LUNETTES ET LES DISQUES COMPACTS sont aussi des dosimètres rétrospectifs de radiations. Le radon et ses produits de désintégration laissent des traces mesurables dans le verre. Il faut sélectionner correctement la zone à tester, car la circulation réduite de l'air entre le visage et le verre entraîne une diminution de

la densité des traces de particules vers le nez. La mesure des traces de particules dans les disques compacts peut se faire à des profondeurs qui révèlent la concentration en radon dissous dans le plastique. Les tests préliminaires font apparaître de bonnes corrélations entre les niveaux ambiants de radon et la densité des traces.

Ce qui vous passe par la tête

Les disques compacts, les verres de lunettes, les cadres photo, et puis quoi encore? J'hésite à me lancer dans des prédictions : la recherche sur les traces de particules gravées est trop imprévisible, j'en ai pour preuve l'histoire de mes propres recherches. Par exemple, mes travaux actuels sur les lunettes découlaient d'études que j'avais réalisées il y a plusieurs décennies, estimant (après coup) l'exposition des astronautes des missions *Apollo* aux dangereux noyaux atomiques lourds du rayonnement cosmique. Cette possibilité m'était apparue par accident.

Un jour, en 1969, je visitai le Centre de vols habités de Houston pour assister à une réunion d'informations pour les scientifiques chargés d'étudier des échantillons lunaires. Afin de nous faire prendre conscience des difficultés que rencontreraient les astronautes pour ramasser les roches à la surface de la Lune, les cadres de la NASA nous ont décrit la complexité de la construction des combinaisons spatiales. J'étais proche de l'endormissement quand le conférencier mentionna en passant que les casques étaient faits dans un plastique transparent appelé polycarbonate *Lexan*. Cela fit tilt dans mon esprit embrumé.

J'étais en effet à l'époque une des rares personnes au monde à avoir conscience que ce matériau était l'un des meilleurs détecteurs de traces de particules pour les ions lourds. Très rapidement, nous avons emprunté plusieurs casques spatiaux. L'examen des traces de particules dans ces casques, qui avaient participé à différentes missions *Apollo*, nous a permis de mesurer avec élégance les ions lourds du rayonnement cosmique : on pouvait même démontrer que certains d'entre eux avaient traversé la tête des astronautes ! Nous avons également obtenu de bons résultats à partir de morceaux de *Lexan* qui avaient été emmenés dans l'espace pour une expérience de biologie (voir la figure 1).

La découverte de traces de particules dans les pièces en plastique des missions *Apollo* eut une retombée aussi heureuse qu'inattendue : elle a amené à la découverte d'une méthode simple pour identifier la composition élémentaire des noyaux individuels. Il suffit de mesurer le rétrécissement

des traces de corrosion en fonction de la distance. Cette technique fonctionne parce que le rétrécissement dépend inversement du taux de corrosion le long de la trace, qui reflète à son tour le taux d'ionisation caractéristique de la nature de la particule au moment où elle pénètre dans le matériau.

Ainsi, en 40 ans d'existence, l'étude des traces de particules attaquées a connu de nombreux rebondissements, dont beaucoup ont donné lieu à des exploitations commerciales.

Personne n'avait anticipé, par exemple, que les traces de particules attaquées seraient un jour utilisées pour fabriquer des filtres avec des trous de calibre uniforme. Pourtant, quelques années après que mes collègues et moi-même eussions envisagé cette possibilité, la Société *General Electric* avait mis sur pied la fabrication de filtres *Nuclepore*. À l'heure actuelle, le marché de ce type de filtres se chiffre à plus de 30 millions de dollars. L'étude des traces de particules attaquées a aussi intéressé l'industrie du pétrole. En effet, le chauffage réduit la longueur des traces fossiles dans les minéraux ; ce phénomène joue donc le rôle de thermomètre pour déterminer la quantité de chauffage subie par une formation géologique dans un lointain passé. C'est une information clef pour savoir si du gaz ou du pétrole ont pu se former suite à un chauffage modéré, ou se sont dissociés par excès de chauffage.

Les heureux hasards en science sont par définition imprévisibles. Je ne pense pas trop m'aventurer en prédisant que la recherche sur les traces de particules sera, dans le futur, couronnée de nombreux succès étonnants.

Robert FLEISCHER est professeur au Département de géologie de *Union College* dans l'État de New York.

Cet article est adapté de *American Scientist*, août 2002. Le site indiqué ci-dessous est intéressant à consulter : <http://www.americanscientist.org/articles/02articles/fleischer.html>

HADLEY et al., *Eyeglass lenses for personal radon dosimetry*, in *Health Physics*, vol. 79, pp. 242-250, 2000.

R. FLEISCHER et al., *Hiroshima neutron fluence on a glass button near ground zero*, in *Health Physics*, vol. 81, pp. 110-113, 2001.
