

## Bac to basics - décembre 1999 - La radioactivité

### Radioactivité :

**c'est ainsi que Marie Curie a dénommé, il y a un peu plus d'une centaine d'années, un phénomène qui allait marquer le XXe siècle. Peut-être parce qu'il est invisible, il reste parfois méconnu. Pourtant, les plus grands physiciens et chimistes du début du siècle en ont expliqué les causes en grande partie.**

Quand est apparue la radioactivité naturelle ?

Dans le cadre du modèle du big-bang, on peut dire que la radioactivité est apparue une fraction de seconde après la formation de l'Univers, il y a quelque 15 milliards d'années. L'explosion cosmique a entraîné une création massive de matière selon la célèbre équation d'Einstein  $E = mc^2$  : énergie = masse  $c^2$  (célérité de la lumière dans le vide)<sup>2</sup>. Les noyaux atomiques, constitués de neutrons et de protons, ont commencé à se former environ quelques dizaines de secondes après l'explosion. Les possibilités d'assemblage des neutrons et des protons étant innombrables, un très grand nombre d'atomes différents a pu se former. Cependant, seule une minorité d'entre eux est stable. Les autres (les radionucléides ou radioéléments) sont radioactifs : ils se désintègrent pour former d'autres noyaux, eux-mêmes pouvant être radioactifs et se désintégrer à leur tour, et ainsi de suite jusqu'à arriver à un élément stable. Les désintégrations sont toujours accompagnées d'un rayonnement qui caractérise la radioactivité. Il est donc possible d'affirmer que la radioactivité naturelle est apparue dès la formation du premier noyau instable.

Pourquoi certains noyaux ne sont pas stables ?

Lorsque Pierre et Marie Curie ont commencé à s'interroger sur l'origine de la radioactivité, la structure de l'atome leur était inconnue. Pourtant, ils pressentaient que ce phénomène était d'origine nucléaire, comme en témoigne l'article qu'a publié Marie Curie en 1899 dans la *Revue générale des sciences* : « L'atome, indivisible au point de vue chimique, est divisible ici, et les sous-atomes sont en mouvement ». En effet, l'origine de l'instabilité des noyaux radioactifs est étroitement liée à sa cohésion. Les nucléons (les neutrons et les protons) sont liés entre eux par une force attractive, appelée « interaction nucléaire forte ». Sa portée est très courte, de l'ordre du femtomètre (10-15m), c'est-à-dire l'ordre de grandeur d'un nucléon. Une autre force, antagoniste de la précédente, agit également dans le noyau : la répulsion coulombienne. Elle tend à repousser deux particules dont la charge électrique est de même signe. Les protons, chargés positivement, sont ainsi éloignés les uns des autres. En revanche, les neutrons, électriquement neutres, ne

subissent pas cette force. Quand les noyaux se sont formés, il régnait dans l'Univers une température phénoménale, propice à l'assemblage des nucléons. Uniquement trois cas de figures peuvent être envisagés dans ces conditions. Le nombre de neutrons et de protons dans l'assemblage peut être tel que, tout à fait par hasard, la force nucléaire forte et la répulsion coulombienne se compensent parfaitement. Le noyau ainsi formé est stable et le restera. Si au contraire, les forces sont excessivement disproportionnées, l'assemblage est totalement instable et ne subsistera pas. Enfin, dans le cas de quelques milliers de noyaux (parmi lesquels environ 2 600 ont été jusqu'à présent mis en évidence), il existe une situation intermédiaire, dans laquelle le noyau n'est certes pas stable au sens propre du terme, mais où il existe pendant une durée limitée avant de se désintégrer pour former un autre élément. Ce temps dépend du déséquilibre entre les deux forces : plus celui-ci est important, plus la « durée de vie » du noyau sera faible. Les noyaux radioactifs connus ont une durée de vie comprise entre moins d'un milliardième de seconde, et plusieurs milliards d'années. Il faut noter que ce temps ne peut être défini que statistiquement. On parle de « demi-vie » ou de « période radioactive » pour désigner le temps que mettra la moitié d'une population de noyaux instables identiques à se désintégrer.

Qu'est-ce qui distingue les différents types de radioactivité ?

Les premiers rayonnements d'origine radioactive furent découverts par Henri Becquerel en 1896(I). Il y voyait « un phénomène de l'ordre d'une phosphorescence invisible ». Mais l'année suivante Joseph John Thomson montra à Cambridge que le rayonnement étudié était en réalité constitué d'électrons. Par la suite, d'autres rayonnements ont été découverts, chacun caractérisant un type de radioactivité. Tous découlent d'une instabilité du noyau, conséquence d'un excès relatif soit de neutrons, soit de protons, soit encore du nombre total de nucléons. Dans ce dernier cas, le noyau atomique peut se couper spontanément en deux noyaux plus petits : c'est la fission nucléaire. On la rencontre dans la nature, avec une probabilité faible, pour les noyaux atomiques les plus lourds (qui ont les plus grands nombres de nucléons). Les principaux exemples sont le thorium 232 et l'uranium 238. La fission s'accompagne d'un dégagement d'énergie très important. Il est mis à profit dans les centrales nucléaires avec des noyaux d'uranium ou de plutonium, plus aptes à subir une fission. Afin de revenir à un état stable, une autre possibilité est l'expulsion simultanée de 2 protons et de 2 neutrons, c'est-à-

dire d'un noyau d'hélium 4. Cet élément est stable et se rencontre couramment dans la nature.

Dans le cas d'un excès de neutrons ou de protons, le noyau peut éjecter l'une de ces deux particules, mais ce phénomène est relativement rare. Il est beaucoup plus courant que la structure interne du noyau soit modifiée pour rétablir l'équilibre : un neutron est transformé en proton, ou un proton en neutron. Dans le premier cas, la transformation d'une particule neutre en particule chargée positivement est accompagnée de l'émission d'un électron (chargé négativement) afin que la neutralité électrique, c'est-à-dire la compensation exacte des charges positives et négatives dans l'atome, soit maintenue. Dans le second cas, il s'agit d'un positron\*

\*Le positron est l'antiparticule de l'électron. Ils sont de masse égale et de charge opposée.

(chargé positivement). C'est ce rayonnement d'électrons ou de positrons qui est détecté. En réalité une seconde particule est émise : un neutrino (avec les positrons) ou un antineutrino (avec les électrons). Cependant, ce rayonnement est très difficilement détectable car il est capable de traverser la Terre entière sans interagir avec elle.

Les noms de rayonnement Alpha et Beta, désignant respectivement l'émission de noyaux d'hélium et celle d'électrons ou de positrons, ont été donnés par Ernest Rutherford en 1899 dans sa description du phénomène : « L'un est très facilement absorbé, on l'appellera par commodité le rayonnement Alpha, et l'autre, de caractère plus pénétrant, sera appelé Beta ». Enfin, un autre rayonnement, appelé Gamma, peut être émis après une émission Alpha ou Beta. Son origine et sa nature sont complètement différentes des cas précédents : il s'agit ici d'un rayonnement électromagnétique, de même nature que la lumière, mais dont les photons sont beaucoup plus énergétiques. Ce rayonnement est observé quand le noyau formé est encore excité, c'est-à-dire quand la désintégration n'a pas permis l'évacuation de toute l'énergie excédentaire contenue dans le noyau instable. Le trop-plein est alors transmis aux photons Gamma.

Quelles sont les sources de radioactivité naturelle ?

Les premiers atomes radioactifs étudiés provenaient de minéraux accumulés par le père d'Henri Becquerel, qui étudiait leurs propriétés de luminescence\*.

\*Luminescence

Propriété d'absorber de l'énergie lumineuse et de la réémettre ensuite sous forme de rayonnement. On distingue le cas où l'émission ne se produit qu'au cours de l'excitation (fluorescence), de celui où elle se poursuit ensuite (phosphorescence).

La découverte de la radioactivité entraîna par la suite une recherche systématique d'autres sources de radioactivité. Ainsi, Marie Curie a passé en revue un grand nombre de métaux, de sels et d'oxydes provenant de diverses collections, comme celles de l'École de physique et de chimie de Paris, ou du Muséum. Aujourd'hui, il est établi qu'il existe trois sources de radioactivité naturelle. Tout d'abord, des noyaux présents depuis la formation de l'Univers. Ils peuvent avoir une demi-vie de plusieurs milliards d'années. L'âge de l'Univers n'étant « que » d'environ 15 milliards d'années, certains noyaux subsistent encore. On en dénombre 25. Les plus connus sont le potassium 40, le thorium 232, l'uranium 235, et l'uranium 238. Ensuite, on compte des descendants de ces éléments, c'est-à-dire des noyaux qui résultent de leur désintégration, et qui eux-mêmes sont radioactifs. Ces éléments sont au nombre de sept, tous découverts entre 1898 et 1938, représentant une quarantaine d'isotopes\* radioactifs. Enfin, une vingtaine de radioéléments sont fabriqués en permanence par action de rayonnements cosmiques sur les hautes couches de l'atmosphère. Les plus importants sont le carbone 14 et le tritium (un isotope de l'hydrogène). L'exposition naturelle n'est pas dangereuse pour l'homme, contrairement aux expositions accidentelles à des sources artificielles car le nombre de désintégrations peut être alors plus important de plusieurs ordres de grandeur.

Comment mesure-t-on la radioactivité ?

Les rayonnements issus de la radioactivité ne sont pas directement perceptibles. C'est le côté « sournois » de la radioactivité : elle est invisible, inaudible, inodore... Elle n'a donc pu être mise en évidence que lorsque l'homme eut à sa disposition des outils d'observation indirecte du phénomène : des plaques photographiques ou des chambres d'ionisation. On ne la mesure que par quantification de ses effets. Toutes les méthodes sont fondées sur le fait qu'un rayonnement crée des ionisations (arrachements d'électrons aux atomes) et des excitations (transmission d'une quantité d'énergie aux atomes qui passent ainsi d'un état fondamental à un état dit excité), et donc laisse une trace au sein même de la matière. En calculant, par unité de temps, le nombre d'ionisations ou d'excitations provoquées par les particules (dans le cas d'un rayonnement a ou b) ou les photons (dans celui d'un rayonnement g), il est

possible de quantifier l'énergie transmise du rayonnement à la matière. Cette énergie est caractéristique du radionucléide émetteur. Le principe des trois grands types de détecteurs les plus couramment utilisés (les compteurs à gaz, les scintillateurs et les semi-conducteurs) est le même : ils convertissent en un signal électrique les photons ou les électrons créés par le rayonnement. L'unité de mesure est le becquerel (Bq) : un becquerel correspond à une activité d'une désintégration par seconde. La sensibilité des détecteurs est très grande. Par exemple, la mesure de 1 000 Bq de césium 137 correspond à la détection de 0,31 milliardième de gramme de cet élément. Ces mesures ne permettent toutefois pas de préjuger les effets, qui, eux, dépendent de la dose reçue. Une autre unité, le gray\*, est utilisée pour la mesure de l'énergie absorbée par unité de masse de matière.

#### Qu'est-ce que la radioactivité artificielle ?

Par opposition aux radioéléments dits « naturels », les radioéléments « artificiels » désignent les éléments radioactifs qui n'existent plus sur la Terre, et qui sont recréés artificiellement. La radioactivité artificielle a été découverte par Irène et Frédéric Joliot-Curie (la fille de Pierre et Marie Curie et son mari) en 1934. En soumettant une mince feuille d'aluminium à un rayonnement de particules a provenant d'une source de polonium, ils ont observé une émission de positrons. Ceux-ci provenaient d'un élément qu'ils sont parvenus à isoler chimiquement : le phosphore 30. Alors qu'ils étaient passés près de la découverte du neutron, ils n'ont finalement pas fait mentir Ernest Rutherford qui aurait déclaré : « *Il vaudrait mieux attendre un an avant de donner le prix Nobel à Chadwick. Ce serait bien le diable si les deux jeunes Français ne font pas une découverte d'ici là* ». En effet, la radioactivité artificielle leur valut le prix Nobel de chimie en 1935, alors que James Chadwick reçut celui de physique pour le neutron. Ces deux découvertes ont marqué un tournant majeur dans la connaissance de la radioactivité. En effet, si Henri Becquerel limitait la radioactivité à une propriété de l'uranium, et Pierre et Marie Curie à une propriété de neuf éléments, il s'avérait qu'elle concernait en réalité tous les éléments de la classification périodique. Par ailleurs, l'homme devenait capable de fabriquer des radioéléments. Les neutrons ont considérablement facilité leur création : électriquement neutres, ces particules peuvent s'approcher facilement d'un noyau qui peut alors les absorber pour mener à un assemblage souvent radioactif. Aussi, il n'est pas surprenant que ces découvertes, encore mystérieuses, aient immédiatement connu un grand intérêt pour des applications biologiques, médicales ou militaires, avec

les réussites, comme pour la compréhension du métabolisme du phosphore dans le corps humain, et les désastres que l'on sait. Lucide, Frédéric Joliot-Curie écrit à ce propos en 1939 dans une description du phénomène de fission et de réaction en chaîne : « *C e n'est qu'une autre façon de prononcer le mot "bombe"* ».

#### Comment se protéger des rayonnements ?

Le danger principal des rayonnements est qu'ils sont imperceptibles. Si Marie Curie ne faisait pas allusion aux dangers des rayonnements, c'est qu'elle n'en avait pas conscience. A la fin de sa vie, ses doigts étaient gravement brûlés par le radium. Elle succomba d'une leucémie. Après la Seconde Guerre mondiale, la prise de conscience des dangers de la radioactivité a entraîné la généralisation de mesures de protection en cas d'exposition prolongée, comme pour le personnel des centrales nucléaires ou les médecins travaillant fréquemment avec des sources radioactives. Les méthodes ne peuvent être que préventives car les effets sont irréversibles. Il y a trois approches pour se protéger des rayonnements : l'éloignement de la source, la réduction du temps d'exposition, et l'interposition d'écrans efficaces. La dose reçue est proportionnelle au temps d'exposition, et inversement proportionnelle au carré de la distance de la source. Le choix des écrans est, quant à lui, fonction du rayonnement. Si une simple feuille de papier arrête un rayonnement a, celui-ci interagissant beaucoup avec la matière, il faut utiliser une feuille métallique pour se protéger d'un rayonnement b, alors que le rayonnement g ne peut être complètement arrêté. Il est toutefois possible de le réduire de façon considérable : trois mètres d'eau, un mètre et demi de béton ordinaire ou trente centimètres de plomb permettent d'atténuer, d'un facteur un milliard, le rayonnement dans le domaine des énergies les plus courantes.

#### Quels sont les effets biologiques de la radioactivité ?

La première observation d'un effet biologique dû à la radioactivité revient encore à Henri Becquerel. Après avoir porté durant quelques jours une petite source de radium dans la poche de son gilet, il a constaté une petite brûlure sur son ventre. Pierre Curie, intrigué, renouvela l'expérience pour aboutir à la même constatation. S'ensuivit dès 1901 un empressement des médecins pour tenter de guérir, entre autres, les tumeurs cancéreuses externes. Les grands succès de ces applications entraînèrent une sorte de frénésie pour le radium, qui a débouché sur nombre de produits curatifs ou embellissants(II). Au début du siècle, les conséquences des expositions étaient pourtant mal connues. Ce n'est plus le cas aujourd'hui(III). Les expérimentations animales, le suivi des personnes exposées à des irradiations

médicales, et celui des survivants après les bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki ou des populations exposées aux conséquences de l'accident de Tchernobyl sont autant de sources d'information rigoureuses pour la détermination des effets. On distingue deux grands types d'effets biologiques : les effets déterministes et les effets stochastiques. Les effets déterministes sont ceux pour lesquels la gravité est fonction de la dose absorbée. Ils apparaissent au-delà d'un certain seuil, qui est fonction de la radiosensibilité des tissus cellulaires. Une dose inférieure à 0,7 gray n'entraîne aucun signe clinique perceptible. Au-delà, les conséquences sont croissantes avec la dose. L'ionisation de constituants vitaux d'une cellule amène inéluctablement à sa mort. Pour un être humain, la chance de survie est nulle au-delà de 6 grays. Ces données sont valables pour une exposition unique et globale : de même que le papier ou le plomb absorbent les rayonnements de manière très différente et assurent ainsi des protections très différentes, les tissus biologiques se de façon variable selon leur nature. Les effets stochastiques, comme leur nom l'indique, sont des effets aléatoires. Ils sont significatifs à l'échelle des populations. Par exemple, on peut citer l'excès notable de cancers de la thyroïde chez les personnes contaminées par l'iode 131 dans l'enfance ou l'adolescence suite à l'accident de Tchernobyl. Au-dessous de 200 millisieverts\*, aucune étude épidémiologique ne révèle de manière catégorique d'excès de cancers. En revanche, au-dessus de 500 mSv, leur fréquence augmente avec la dose reçue. Les irradiations provoquent des mutations au sein du génome des cellules, qui, combinées à d'autres mutations susceptibles d'apparaître au cours du temps, peuvent aboutir à la formation d'un cancer que l'on appelle alors « radio-induit ». Il faut souligner que les effets biologiques sont identiques qu'il s'agisse de radioactivité artificielle ou naturelle puisqu'il s'agit du même phénomène. Simplement alors que l'exposition naturelle, bien que dépendante de la nature du sol et de l'altitude, est constante (on l'estime en France à 2,4 mSv par an), l'exposition artificielle peut être très variable : principalement d'origine médicale, elle est estimée à 1,1 mSv par an, mais varie d'un individu à l'autre selon son activité ou les soins qu'il reçoit.

Comment la radioactivité permet-elle la datation ?

Chaque élément radioactif possède une certaine probabilité de se désintégrer chaque seconde. Cette probabilité est propre à l'élément et est constante au cours du temps. En considérant le nombre de radioéléments présents à un instant donné et en le comparant au nombre initial, on déduit le nombre d'éléments qui se sont désintégrés et donc le temps écoulé. La difficulté est d'estimer la quantité initiale

d'éléments. Dans la nature, certains éléments radioactifs sont présents en nombre constant car ils sont en régénérés dans les hautes couches de l'atmosphère. Or, ces éléments tels que le carbone ou l'oxygène, font l'objet d'échanges permanents entre les êtres vivants et le milieu extérieur. Le rapport entre l'élément radioactif et son homologue stable dans les tissus biologiques est donc identique à celui observé dans le milieu extérieur. La mort marque l'arrêt des échanges. Les éléments radioactifs disparaissent alors peu à peu des tissus biologiques. Leur mesure à un instant donné permet donc de dater la mort de l'individu, avec une certaine marge d'erreur due à la mesure d'une part, et d'autre part à l'hypothèse que le rapport entre l'élément radioactif et l'élément stable fut constant au cours du temps. Les quatre éléments les plus fréquemment pris en compte sont le carbone 14, le potassium 40, le thorium 232, et l'uranium 238. Le carbone 14, dont la période radioactive est égale à 5 730 ans, est par exemple utilisé très fréquemment pour tout ce qui a trait aux activités humaines, permettant une datation jusqu'il y a environ 50 000 ans. La période radioactive du potassium 40 est de 1,3 milliard d'années. On l'utilise, par exemple, pour dater les minéraux volcaniques dont l'âge varie entre quelques centaines de millions et un milliard d'années. Avec une période de 14 milliards d'années, le thorium 232 a, quant à lui, contribué à la datation de l'âge de la Terre. Toujours radioactif, il est en effet un témoin parfait de l'histoire de notre planète.

Mathieu Nowak