

Table des matières

Introduction	5	La radioprotection	
Itinéraire d'une femme de science	6	Les unités de mesure en radioprotection	23
Une révolution scientifique	8	L'effet des différents rayonnements	24
Un monde en marche	10	Le risque biologique	25
Stabilité des noyaux et radioactivité		La gestion des déchets radioactifs	26
Les réactions nucléaires, au cœur de la matière	13	Applications de la radioactivité	
Pourquoi certains noyaux ne sont pas stables.....	14	Le diagnostic médical	27
Les isotopes radioactifs ou radioisotopes	15	Le traitement médical	28
La période de désintégration radioactive	16	La datation au carbone 14.....	29
Isotopes et séparation	17	D'autres applications.....	30
Le phénomène de la radioactivité		Pistes bibliographiques	31
La radioactivité spontanée: les émissions α , β , γ	18		
Une réaction nucléaire provoquée: la fission	19		
Une réaction nucléaire provoquée: la fusion	20		
Radioactivité et vie quotidienne			
Les sources de radioactivité	21		
La mesure de la radioactivité	22		

Introduction

Marie Skłodowska Curie, «symbole et passion». L'histoire - et dans le cas qui nous occupe, l'histoire des sciences en particulier - est peuplée d'hommes et de femmes détachés de leur contexte et s'offrant à nous sous une forme souvent plus mythique que réelle. Pour les comprendre il faut avant tout tenter de comprendre le contexte de leur vie et de leurs travaux, essayer de percevoir à la fois ce qui a fait les conditions de leurs réussites (et aussi de leurs échecs). Il est utile de s'interroger aussi sur leur image telle qu'elle nous est parvenue, une image parfois déformée selon les nécessités du moment.

Marie Curie incarne à la fois les valeurs d'une société d'hier et d'aujourd'hui et des valeurs que nous percevons comme intemporelles: valeurs d'hier, une croyance aveugle dans une science où se confondent progrès industriel, scientifique et social; valeurs d'aujourd'hui, l'égalité entre hommes et femmes, la coopération entre les nations et le rejet de nationalismes identitaires; valeurs intemporelles en apparence, la science comme outil de perfectionnement de soi et progrès de l'humanité, de meilleure connaissance du monde et de l'humain.

Marie Curie a vécu une période où les concepts scientifiques et la perception de la nature ont radicalement changé. Ses travaux ont contribué de façon déterminante à ces changements. Il est important de comprendre comment la recherche de Marie Curie a pu être menée autant que les résultats bruts qu'elle a produits. Ce carnet pédagogique vous présente, de manière accessible, une synthèse des apports des travaux de Marie Curie et des savants de son temps, ainsi que des avancées scientifiques qui en découlent. Nous espérons qu'il vous permettra de mieux comprendre ces acquis scientifiques ainsi que de n'en mesurer l'impact sur notre quotidien tant sur le plan philosophique que pratique.

Marie Sklodowska Curie, 1867-1934

Itinéraire d'une femme de science

Née en 1867 à Varsovie, Maria Sklodowska affiche dès son plus jeune âge une passion pour les études. En 1891, elle part à Paris afin d'étudier les sciences physiques et mathématiques à la Sorbonne, où elle accomplit un parcours exemplaire. En 1894, elle rencontre Pierre Curie avec qui elle se mariera et aura deux enfants: Irène et Ève.

Marie Curie est une brillante scientifique, qui mène une existence active, riche d'amitiés, ponctuée de voyages, d'engagements politiques... une femme moderne. Engagée, elle est convaincue que la collaboration entre chercheurs est une condition nécessaire pour l'avancement des sciences. Elle participe à de nombreux congrès et commissions scientifiques. Tout comme d'autres intellectuels de son temps, elle s'investit pour faciliter la coopération entre les sociétés savantes et les universités des différents pays. Plus particulièrement, elle s'oppose à l'exclusion des savants allemands qui, suite à la Première Guerre mondiale et par mesure de rétorsion à l'égard de leur pays, sont mis à l'écart des rencontres scientifiques internationales. En 1922, elle accepte de faire partie de la Commission Internationale de Coopération Intellectuelle (la CICI, créée à Genève au sein de la Société des Nations et qui sera à l'origine de l'UNESCO) et en deviendra vice-présidente en 1928. Elle fera usage de toute sa notoriété

pour créer des institutions de recherche et des instituts médicaux tels que la Fondation Curie ou l'Institut du Radium de Varsovie.

Pour Marie Curie, la science est moteur de progrès et de bien-être pour l'humanité. La découverte du radium, par exemple, débouche rapidement sur une exploitation industrielle. Cependant, et conformément à sa philosophie, Marie Curie ne dépose pas de brevet pour sa découverte. L'industrie s'empare donc du procédé qu'elle a mis au point. Face à cette difficulté et confrontée à d'importants besoins de radium dont le prix ne cesse d'augmenter, Marie Curie entame des collectes de fonds, notamment auprès des femmes américaines, afin de doter différents laboratoires du radium nécessaire.

Toujours dans le même esprit, Marie Curie s'impliquera dans des causes humanitaires. Lorsque la Première Guerre mondiale éclate, les services de radiologie militaires sont encore peu organisés. Marie Curie, avec son habituelle détermination, va déployer toute son énergie à équiper des ambulances en matériel radiologique. Ces ambulances seront baptisées «Petites Curie».

Accompagnée de sa fille Irène, elle part sur le front en France et en Belgique et initie les services médicaux à la radiologie.

Marie Curie est enfermée par ses contemporains dans une image stéréotypée de savante et de «mère-épouse». Cette image, entre mythe et réalité, construite par son époque, répond aux conventions et lui vaut une certaine reconnaissance sociale qui est favorable à sa réussite scientifique. L'ensemble de ses réussites a contribué à la construction de ce mythe: elle sera la première femme à recevoir un Prix Nobel, celui de Physique en 1903 avec Pierre Curie et Henri Becquerel, puis un deuxième, celui de Chimie en 1911. Elle sera aussi la première femme à être nommée professeur à la Sorbonne à la Chaire de Physique en 1906 ou encore à participer aux Conseils de Physique Solvay où elle est la seule femme présente jusqu'en 1933.



Une révolution scientifique

En 1897, Marie Curie cherche un sujet de thèse. Elle choisit de travailler sur les «rayons uraniques», émis spontanément par certains sels d'uranium, et que Becquerel vient de mettre en évidence. Après avoir testé différents minerais d'uranium, elle découvre que la pechblende émet plus de rayonnements que l'uranium lui-même. Marie Curie émet l'hypothèse qu'il existe, dans ce minerai, à l'état d'impureté, un nouvel élément beaucoup plus (radio)actif que l'uranium. Avec l'aide de son mari, Pierre Curie, et par le biais de méthodes traditionnelles de la chimie (précipitations, électrolyse,...), elle isole finalement en 1898 deux éléments qu'elle qualifie de «radioactifs»: le polonium et le radium. En 1902, grâce à son travail fait autant d'intelligence, de courage que de ténacité, Marie Curie détermine les propriétés chimiques et la masse atomique du radium et l'introduit en tant que nouvel élément de la classification périodique de Mendeleïev. En 1903, Pierre et Marie Curie reçoivent, avec Henri Becquerel, le Prix Nobel de Physique pour la découverte de la radioactivité. Néanmoins, certains scientifiques, bien que très intéressés par ces découvertes, restent sceptiques quant à l'existence de ces nouveaux éléments et les propriétés nouvelles qu'on leur attribue. Marie Curie choisit de poursuivre ses recherches sur le radium afin d'en isoler des sels purs. Le procédé d'isolement est long et Marie Curie

le paiera de sa santé en maniant des tonnes de pechblende, subissant progressivement les rayonnements radioactifs des éléments si précieux qu'elle recherchait inlassablement. Parallèlement, Ernest Rutherford et son élève Frederick Soddy contribuent à l'interprétation de la radioactivité en montrant qu'elle est une transmutation spontanée d'un élément instable en un autre. Ainsi, le radium et le polonium sont des descendants de l'uranium par filiations radioactives. En 1911, Rutherford, suite à des recherches sur la structure de l'atome, met en évidence l'existence d'un noyau atomique, autour duquel gravitent des électrons chargés négativement. Jusque-là, le modèle d'atome adopté est celui de Joseph John Thomson, modèle selon lequel l'atome est composé d'une masse de charge positive dans laquelle baignent des électrons chargés négativement mais qui ne comporte pas de noyau. Face à ces différentes structures atomiques, Marie Curie appuie le modèle de Rutherford qui vient confirmer ce qu'elle avait pressenti: le noyau est le siège de la radioactivité. Cette même année est aussi celle du second Prix Nobel de Marie Curie, celui de Chimie, qu'elle reçoit pour ses recherches sur le radium.

La radioactivité, le noyau atomique et la structure de l'atome deviendront des sujets d'étude convergents et resteront au cœur des débats encore de nombreuses années. Le Conseil de Physique Solvay, incontournable rendez-vous de scientifiques à Bruxelles créé sur l'initiative d'Ernest Solvay, et auquel Marie Curie participa depuis sa première édition de 1911, aura pour thème en 1933 «La structure et les propriétés des noyaux atomiques».



Un monde en marche

Les découvertes de Marie Curie et des chercheurs qui lui sont contemporains ouvrent la voie à de multiples avancées scientifiques, sources de nombreux progrès pour la société.

Ainsi, du point de vue médical, la découverte du radium et de son pouvoir thérapeutique suscite un incroyable engouement populaire. Au-delà d'une réelle utilisation médicale, le radium est commercialisé sous différentes formes: sérums, pommades, injections, boues, bains... Une véritable «folie du radium» qui tient à la fois du mythe et du commerce. Parallèlement, le radium devient l'outil essentiel d'une nouvelle médecine, la «radiumthérapie», aussi appelée «curiethérapie»: celle-ci est appliquée dans le traitement de cancers, tuberculoses, problèmes dermatologiques... Aujourd'hui, la radiothérapie consiste à administrer des éléments radioactifs dont le rayonnement entraîne la mort des cellules tumorales. En 1923, Georg von Hevesy met au point la méthode des traceurs: il montre qu'il est possible de suivre la trace d'un élément radioactif à travers un organisme vivant. En 1936, le phosphore radioactif est utilisé pour la première fois pour soigner les leucémies, tandis que le traitement des cancers de la thyroïde par l'iode radioactif débute en 1940. En 1942, la production industrielle d'isotopes radioactifs élargit les

possibilités de diagnostic et de thérapie de diverses maladies et donne naissance à la médecine dite «nucléaire».

La découverte de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie représente un grand pas en avant vers l'utilisation et le contrôle de la radioactivité. Ils sont les premiers à fabriquer des noyaux radioactifs de manière artificielle. En 1935, ils recevront le Prix Nobel de Chimie pour leurs travaux. Le neutron, identifié par James Chadwick en 1932, se révèle être un projectile capable de bouleverser la structure du noyau des atomes. En 1939, Frédéric Joliot-Curie démontre que la fission des noyaux d'uranium s'accompagne d'un intense dégagement de chaleur et prévoit déjà les énormes ressources énergétiques qu'elle pourrait apporter à l'humanité.

Les applications de la radioactivité artificielle sont bénéfiques mais peuvent aussi s'avérer être de redoutables outils de destruction. Toute sa vie, Frédéric Joliot-Curie luttera pour que seules des applications pacifiques de l'énergie nucléaire soient utilisées. Les recherches sur l'énergie nucléaire se multiplient au cours de la Seconde Guerre mondiale.

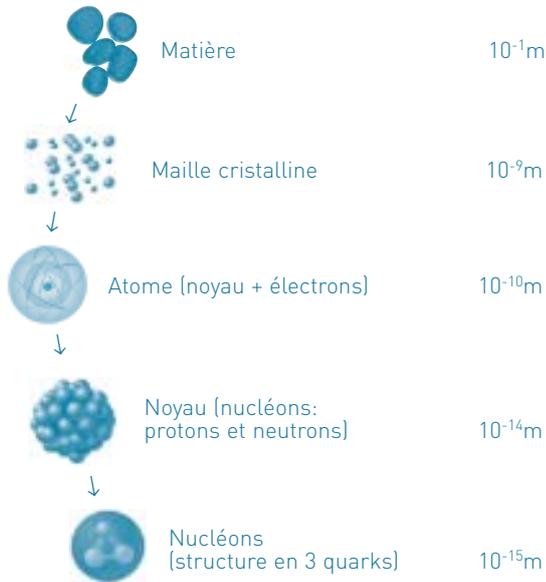
Dès décembre 1942, Enrico Fermi fait fonctionner le premier réacteur graphite-uranium. Aux Etats-Unis, le projet Manhattan, dirigé par Robert Oppenheimer, a pour objectif de doter le pays d'une arme nucléaire. Les recherches sur l'énergie dégagée par la réaction de fission sont ensuite poursuivies en vue de son utilisation civile: les premières centrales nucléaires apparaissent dans les années '60. L'électricité d'origine nucléaire représente aujourd'hui une part importante de la production énergétique et les recherches se poursuivent vers l'étude de la fusion thermonucléaire contrôlée, source quasi inépuisable d'énergie.



Stabilité des noyaux et radioactivité

Les réactions nucléaires, au cœur de la matière

Zoom sur la matière



Réactions nucléaires et réactions chimiques

- Les réactions chimiques mettent en cause les électrons externes du nuage électronique. Les réactions nucléaires impliquent des modifications au niveau des noyaux atomiques.
- La conservation des noyaux atomiques est une règle intangible des réactions chimiques: la nature des éléments n'est pas modifiée. Les réactions nucléaires s'accompagnent de la transformation d'éléments en d'autres éléments et même souvent d'une variation du nombre des atomes (par fission ou fusion).
- Dans les réactions nucléaires, les énergies libérées sont des centaines de milliers ou des millions de fois plus importantes que dans les réactions chimiques.

Dans un cm^3 d'eau...

... il y a autant d'atomes que de gouttelettes d'eau dans la Méditerranée.

Stabilité des noyaux et radioactivité

Pourquoi certains noyaux ne sont pas stables

La radioactivité est un phénomène qui trouve son origine au cœur de l'atome, dans le noyau. Certains noyaux sont stables, d'autres instables (ils sont radioactifs).

Les nucléons du noyau sont liés entre eux par une force attractive, appelée **interaction nucléaire forte**, de très courte portée. Une autre force, antagoniste de la précédente, agit également dans le noyau: **la répulsion coulombienne**, qui tend à écarter l'un de l'autre les protons, chargés positivement.

La stabilité ou l'instabilité d'un noyau résulte de la compétition entre ces deux forces:

- si la force nucléaire forte et la répulsion coulombienne se compensent parfaitement, le noyau est stable;
- dans quelques milliers de cas, le noyau n'est pas stable au sens propre du terme mais il existe pendant une durée limitée avant de se désintégrer pour former un autre noyau.

Les transformations nucléaires successives conduisent à des noyaux stables.

Des temps de vie très courts...

Certains noyaux vivent si peu de temps qu'ils n'ont pas le temps de s'entourer d'un cortège électronique.

Stabilité des noyaux et radioactivité

Les isotopes radioactifs ou radioisotopes

Les isotopes sont des atomes comportant les mêmes nombres de protons et d'électrons mais un nombre différent de neutrons. Ils possèdent:

- les mêmes propriétés chimiques
- des comportements nucléaires différents

Les radioisotopes naturels

- Noyaux présents depuis la formation de l'Univers:

^{238}U , ^{40}K , ^{32}Th ...

- Noyaux issus de la désintégration de ces éléments:

^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po ...

- Radioéléments fabriqués en permanence par l'action des rayonnements cosmiques: ^{14}C , ^3H , ^7Be ...

Les radioisotopes artificiels

- Ce sont des radioisotopes n'existant plus sur Terre et recréés artificiellement: ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs ...

des radioisotopes célèbres...

- l'uranium 235, combustible des réacteurs nucléaires
 - le radium 226, découvert par Marie Curie
 - le carbone 14 employé pour les datations
- le potassium 40, assimilé à travers les aliments
 - le cobalt 60, utilisé en radiothérapie

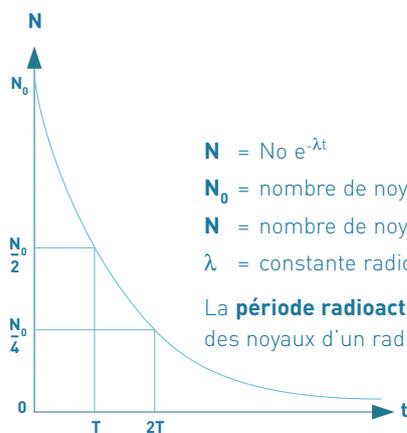
15

Stabilité des noyaux et radioactivité

La période de désintégration radioactive

La radioactivité est un phénomène spontané et aléatoire: on ne peut prédire à quel instant un noyau donné va se désintégrer.

La population des radioéléments restants décroît selon une loi exponentielle avec le temps.



Quelques périodes

^{238}U (combustible dans les réacteurs nucléaires):

4,47 milliards d'années

^{14}C (datation): 5.730 ans

^{60}Co (radiothérapie): 5,27 ans

^{123}I (médecine nucléaire): 13,2 heures

Une bougie brûlant à petit feu met du temps à se consumer...

Plus un isotope vit longtemps, moins il est radioactif.

Ainsi, pour l' ^{235}U qui vit 4,5 milliards d'années, un noyau sur 45 millions se désintègre chaque siècle.

16

Stabilité des noyaux et radioactivité

Isotopes et séparation

La séparation des isotopes d'un même élément ne peut être basée que sur leur différence de masse puisque leurs propriétés chimiques sont identiques.

Parmi les méthodes utilisées:

- **la distillation fractionnée** basée sur la différence de volatilité.
- **la centrifugation** basée sur la réponse différente (selon leur masse) des isotopes dans une centrifugeuse ultra-rapide.
- **la spectrométrie de masse** qui utilise la déviation différente (selon leur masse) des isotopes d'un faisceau soumis à un champ électrique.

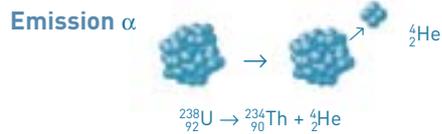
Isotopes et reconstitution du climat du passé

Les molécules d'eau des océans contenant les isotopes 16 et 18 de l'oxygène se séparent naturellement, par distillation fractionnée, en fonction de la température que règne sur Terre. L'étude isotopique des glaces polaires permet donc de reconstituer le climat du passé.

Le phénomène de la radioactivité

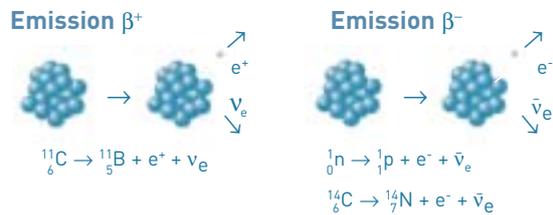
La radioactivité spontanée: les émissions α , β , γ

- Les noyaux lourds (N et Z grands) cherchent la stabilité en émettant un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$. C'est la **radioactivité α** .

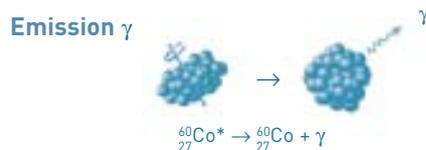


- Les noyaux présentant un déséquilibre entre le nombre de protons et de neutrons cherchent la stabilité:

- dans le cas d'un **excès de neutrons**, en transformant un neutron en un proton (avec émission d'un électron et d'un antineutrino). C'est la **radioactivité β^-** ;
- dans le cas d'un **excès de protons**, en transformant un proton en un neutron (avec émission d'un positon et d'un neutrino). C'est la **radioactivité β^+** .



- Après une émission α ou β , le noyau peut-être dans un état dit excité: il possède un excès d'énergie qu'il libère sous la forme d'un ou plusieurs photons γ .



Le rôle des alchimistes brisé...

La filiation radioactive (série de désintégrations en cascade) de l' U^{238} s'arrête à la 14^e génération, avec le ${}^{206}\text{Pb}$. Le plomb, élément stable, ne se transformera jamais spontanément en or!

Le phénomène de la radioactivité

Une réaction nucléaire provoquée: la fission

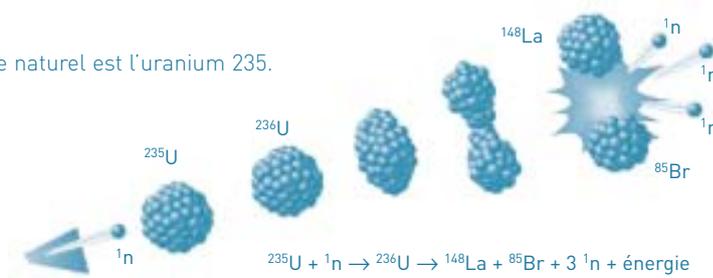
Au cours de la réaction de **fission**, un noyau lourd instable (fissile) se brise en noyaux plus légers. Cette réaction libère généralement une vaste quantité d'énergie ainsi que 2 ou 3 neutrons.

La fission peut se produire spontanément mais c'est un phénomène rare. Elle est en général provoquée en bombardant la matière fissile avec un neutron.

Dans les réacteurs nucléaires, les neutrons produits lors de la fission d'un noyau d' ^{235}U provoquent à leur tour la fission d'autres noyaux, source de nouveaux neutrons... C'est le principe de la **réaction en chaîne**.

La réaction en chaîne peut prendre un tour explosif (bombe atomique) ou être maîtrisée dans les réacteurs nucléaires, par l'absorption dans des barres de contrôle d'une partie des neutrons.

Le seul noyau fissile naturel est l'uranium 235.



Des réacteurs nucléaires naturels...

Il y a 1950 millions d'années, sur le site d'Oklo, au Gabon, un réacteur nucléaire naturel a fonctionné spontanément durant plusieurs milliers d'années, en dégageant de la chaleur par fission, et cela en raison d'une forte concentration d' ^{235}U .

Le phénomène de la radioactivité

Une réaction nucléaire provoquée: la fusion

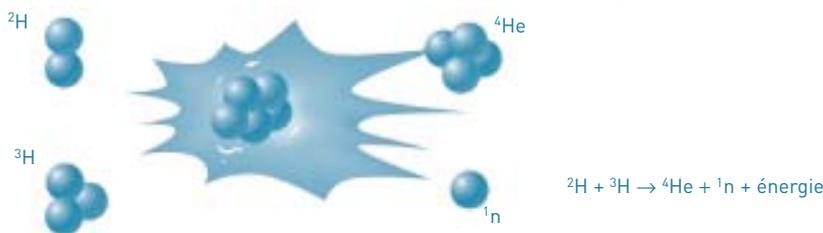
Au cours de la **fusion** (ou **réaction thermonucléaire**), deux noyaux légers se combinent pour n'en former qu'un seul, plus lourd et plus stable. Elle s'accompagne de la libération de grandes quantités d'énergie et génère moins de déchets que la fission.

La fusion nécessite des conditions expérimentales extrêmes (de pression, de température, de densité); elle n'arrive jamais spontanément sur Terre.

En revanche, elle se produit en permanence au cœur du Soleil et des étoiles, qu'elle alimente en énergie.

Véritables réacteurs thermonucléaires, les étoiles et le Soleil libèrent de formidables quantités d'énergie sous forme de rayonnement (la lumière et la chaleur qui nous proviennent sur Terre).

Aujourd'hui, on sait réaliser, dans des Tokamaks, la fusion de deutérium et du tritium, en contrôlant raisonnablement bien l'énergie libérée. La construction d'un réacteur expérimental, en vue de la production d'énergie par fusion, est à l'étude.



Questions d'énergie...

L'énergie libérée par la fission de 7g d'uranium équivaut à l'énergie libérée par la combustion d'une tonne de charbon ou de 45 tonnes de bois.

Chaque réaction de fusion permettrait de produire 4 fois plus d'énergie qu'une réaction de fission.

Radioactivité et vie quotidienne

Les sources de radioactivité

La radioactivité est omniprésente dans notre vie. Elle est d'origine naturelle ou artificielle.

La radioactivité naturelle provient:

- du radon, gaz naturel radioactif, issu de la désintégration de l'uranium: **34%**
- de la radioactivité du sol, provenant de l'uranium, du thorium et du potassium présents dans les roches terrestres: **11%**
- des rayonnements cosmiques qui bombardent la Terre en permanence: **7%**
- de notre alimentation, à travers laquelle nous assimilons du potassium 40, du carbone 14, du tritium: **6%**

La radioactivité artificielle provient:

- des examens et traitements médicaux: **41%**
- des essais nucléaires et de l'industrie: **1%**

Quelques valeurs d'exposition aux rayonnements

- exposition moyenne de la population: **4.000 µSv/an**
- radon: **1.360 µSv/an**
- centrale nucléaire: **10 µSv/an**
- un vol aérien de 10h: **50 µSv**
- une radiographie: **1.000 µSv**

Toujours plus de radiations...

Depuis 1900, la dose d'exposition aux radiations a doublé, en raison notamment du développement des examens médicaux.

Au total, en tenant compte de l'augmentation de l'espérance de vie, l'exposition aux rayonnements sur toute une vie a triplé

21

Radioactivité et vie quotidienne

La mesure de la radioactivité

La radioactivité est invisible, inaudible, inodore...

Pour la mesurer, il faut des détecteurs spécifiques tels que le compteur Geiger. Dans ces détecteurs, les rayonnements provoquent des ionisations du milieu: ils arrachent des électrons aux atomes; ceux-ci sont accélérés par un champ électrique et produisent un signal.

Unités de mesure

Le **Becquerel** mesure l'activité d'une source radioactive, c'est-à-dire le nombre de désintégrations d'un noyau par seconde.

Autrefois, l'activité était exprimée en **Curie**. Un Curie correspondait à l'activité d'un gramme de radium.

L'activité de quelques sources radioactives



un gramme de radium
37 milliards de Bq



un litre de lait
60 Bq



un litre d'eau de mer
10 à 15 Bq



une tonne de granit
7 à 8 millions de Bq



un enfant de 5 ans
600 Bq



un adulte (70kg)
10 000 Bq

1 Cu = 37.000.000.000 Bq.

Pas de panique!

A raison de 10 000 désintégrations d'atomes de notre corps par seconde, il faudrait 20 ou 30 millions de milliards d'années pour épuiser les 10^{27} atomes de notre corps.

22

La radioprotection

Les unités de mesure en radioprotection

- Le **Becquerel** mesure l'**activité** d'une source radioactive. Cette mesure rend compte du nombre de désintégrations par seconde mais pas de leur énergie ni de leur effet sur l'homme.
- Le **Gray** mesure la **dose** de rayonnement **absorbée**, c'est-à-dire la quantité d'énergie cédée par le rayonnement à une unité de masse de la matière absorbante. 1 Gray (Gy) = 1Joule par kilogramme
- Les effets des rayonnements dépendent de leur nature et de l'organe irradié.
 - le **Sievert** (Sv) mesure la **dose équivalente**. Un Sievert correspond à une dose absorbée (en Gy), pondérée par un facteur tenant compte des différents pouvoirs d'ionisation des rayonnements (α , β , γ , X, neutrons).
 - le **Sievert** mesure également la **dose efficace**. Un Sievert correspond à une dose absorbée (en Gy), pondérée par un facteur tenant compte de la sensibilité de l'organe irradié.

Analogie

Un enfant jette des graviers sur son camarade.
Les Becquerel mesurent le nombre total de graviers envoyés.
Les Gray correspondent à la force avec laquelle certains graviers atteignent l'enfant.
Les Sievert évaluent les lésions laissées sur l'enfant par les projectiles
(le même gravier dans la jambe ou dans l'œil aura un effet différent)

23

La radioprotection

L'effet des différents rayonnements

Les effets des rayonnements sont dus à leur action ionisante (directe ou indirecte): ils arrachent des électrons au milieu qu'ils traversent, brisent les liaisons moléculaires, modifient les propriétés des molécules et affectent le fonctionnement des cellules.

Les particules chargées sont directement ionisantes.

- **Les particules α** (particules d' ^4He) sont peu pénétrantes: elles sont arrêtées par quelques centimètres d'air ou par l'épiderme de la peau. Mais elles sont très ionisantes et transfèrent localement beaucoup d'énergie. Un émetteur α est donc dangereux lorsqu'il se fixe à l'intérieur du corps.
- **Les rayons β** (e^- ou e^+) sont plus pénétrants que les particules α mais moins ionisants: ils sont arrêtés par 1/2 cm d'aluminium ou 1 cm de tissu humain. En cas d'absorption et pour un même dépôt d'énergie, les rayons β sont moins nocifs car l'énergie est déposée sur une plus longue distance.

Les rayonnements non chargés mettent en mouvement des particules chargées, lesquelles ionisent, à leur tour, les atomes (ionisation indirecte).

- **Les rayons γ** (photons) possèdent un fort pouvoir de pénétration. Leur pouvoir d'ionisation est équivalent à celui des rayons β . Ils sont beaucoup plus difficiles à arrêter et nécessitent, pour s'en protéger, d'épais écrans de plomb. En revanche, les émetteurs γ peuvent être moins nocifs lorsqu'ils sont absorbés.
- **Les neutrons** sont facilement ralentis par des noyaux légers (des molécules hydrogénées). Les matériaux tels que la paraffine ou l'eau peuvent les arrêter. Ils sont très agressifs pour le corps humain.

En bref...

Plus l'ionisation est intense, plus le parcours est court.

De manière générale, plus un rayonnement est facilement arrêté en externe, plus il est dangereux si son émetteur s'est fixé dans l'organisme.

Le bœuf contre la grenouille!

Véritable "bulldozer", une particule α est peu perturbée par les électrons qu'elle arrache aux atomes situés sur son parcours. En effet, elle est beaucoup plus lourde que les électrons qu'elle rencontre. Le rapport des masses est de 8.000.

La radioprotection

Le risque biologique

Les modes d'exposition aux rayonnements

On parle d'**irradiation externe** quand la source de rayonnement est située à l'extérieur de l'organisme.

L'irradiation peut être ciblée et intentionnelle (exemple: la radiothérapie).

On parle d'**irradiation interne** quand des particules radioactives ont pénétré dans un organisme par inhalation, ingestion ou blessure de la peau.

Les effets des rayonnements dépendent:

- de la dose absorbée;
- de la nature du rayonnement: les particules α sont 20 fois plus toxiques, à dépôt d'énergie égal, que les rayons γ ;
- de l'organe touché: la sensibilité des gonades est 20 fois supérieure à celle de la peau.

Quels types de dégâts?

Les ionisations provoquées par les rayonnements peuvent tuer les cellules sur le champ ou y occasionner des changements capables de provoquer des cancers ou des modifications génétiques. En particulier, elles peuvent aggraver les cellules jouant un rôle dans la reproduction ou affecter des structures aussi complexes et cruciales que la molécule d'ADN.

Les normes de radioprotection

Internationalement reconnues, elles ont été fixées en fonction de l'analyse des effets constatés sur les 258.000 survivants d'Hiroshima et Nagasaki.

25

La radioprotection

La gestion des déchets radioactifs

Les déchets radioactifs proviennent des réacteurs nucléaires mais également de l'industrie, des centres de recherche, des hôpitaux...

Ils sont classés selon:

- leur niveau d'activité (lié à la nature des rayonnements émis) qui conditionne l'importance des protections à utiliser
- leur durée de vie qui définit la durée de leur nuisance potentielle.

■ les déchets à vie courte, de faible et moyenne activité

Leur période radioactive n'excède pas 30 ans. Au bout de 300 ans (10 périodes), ils ont perdu presque toute leur activité. Ces déchets sont compactés dans des fûts en acier ou en béton et entreposés en surface.

■ les déchets à vie longue

Leur durée de vie est de milliers voire de centaines de milliers d'années. Ces déchets sont coulés dans du bitume ou du verre.

Leur devenir fait l'objet d'un moratoire depuis 1991. Les options envisagées sont le stockage en formation géologique profonde (option étudiée grâce à la réalisation de laboratoires souterrains), leur transformation en déchets radioactifs à vie plus courte (en cassant les noyaux en d'autres noyaux plus petits par le biais d'accélérateurs de particules) et le conditionnement et l'entreposage de longue durée en surface.

En attendant une décision finale, ils sont entreposés en surface.



Lourde responsabilité...

Les déchets de forte activité ne représentent que 10% du volume total des déchets radioactifs produits en France mais ils sont responsables de 95% de la radioactivité totale.

Applications de la radioactivité

Le diagnostic médical

L'utilisation des rayonnements constitue, en médecine, un outil irremplaçable pour l'exploration des fonctions du vivant et la détection de certaines maladies.

■ La **radiologie** utilise l'aptitude des rayons X à être absorbés de manière différente par les diverses composantes du corps humain. Elle permet de dépister des fractures et certaines maladies pulmonaires, digestives ou osseuses.

■ Pour d'autres techniques, telles que la **scintigraphie**, ce n'est pas le rayonnement lui-même que l'on utilise mais un radioisotope (appelé traceur) dont on suit le cheminement, à travers le corps, grâce au rayonnement qu'il émet. La fixation, par un organe, d'une quantité anormalement élevée de certaines substances, révélée par le traceur, peut indiquer une affection (par exemple cancéreuse).

■ La **Tomographie par Emission de Positons** (TEP) permet de diagnostiquer des maladies cancéreuses, cérébrales et cardiaques. Elle utilise l'administration de substances comportant des isotopes émetteurs de positons et se fixant de manière plus intense sur les tissus malins. Les positons s'annihilent avec les électrons de la matière en émettant des photons, dont la détection permet de localiser les cellules marquées.

Les isotopes au service de la médecine.

90% des radioisotopes employés en médecine sont utilisés à des fins diagnostiques et 10% pour la thérapie.

27

Applications de la radioactivité

Le traitement médical

Pour les usages thérapeutiques, la médecine met à profit la faculté des rayonnements à endommager, par ionisation, les cellules humaines et, en particulier, à détruire les cellules cancéreuses.

Quelques exemples de traitement

■ La **curiethérapie** utilise des substances radioactives en contact direct avec les tissus.
Par exemple, l'iode 131, utilisé à faibles doses comme traceur pour diagnostiquer les lésions de la thyroïde, est employé, à plus forte dose, pour le traitement des cancers de la glande.

■ La **radiothérapie** utilise des sources radioactives toujours séparées des tissus.

L'ionisation provoquée par les radiations altère la composition de l'information génétique des cellules cancéreuses, les rendant incapables de se reproduire. Aujourd'hui, les techniques visent à améliorer le ciblage de la tumeur à irradier, de manière à minimiser la dose reçue par les tissus sains avoisinants.

Concrètement...

Chaque année, en Europe, plus de 12 millions de procédures médicales (diagnostic et thérapie) utilisent des radioisotopes.

28

Applications de la radioactivité

La datation au carbone 14

Le carbone 14, isotope radioactif du carbone, présent en infime quantité dans l'atmosphère, est assimilé en permanence par les végétaux et être vivants.

Cet isotope est constamment régénéré par les rayons cosmiques.

Dès qu'un organisme vivant meurt, les échanges avec le monde extérieur cessent: le ^{14}C qu'il contient n'est plus renouvelé.

Quand bien plus tard, un archéologue examine les vestiges, le nombre de noyaux de ^{14}C a décré selon une loi exponentielle, de période 5.730 ans: $N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$.

Il date alors le fossile en comparant la fraction de noyaux de carbone 14 subsistant, $N(t)$, à la fraction existante au moment où l'échantillon s'est «fermé» aux échanges avec l'extérieur, $N(0)$.

L'hypothèse employée est que la teneur de radioélément au moment de la «fermeture» est la même que celle mesurée sur un échantillon de carbone prélevé sur un organisme actuel. On suppose, en effet, que le bombardement cosmique est constant à l'échelle de quelques milliers d'années.

Un témoin parfait de l'histoire de notre planète.

Avec une période de 14 milliards d'années, le ^{232}Th a contribué à la datation de l'âge de la Terre et de l'Univers.

29

Applications de la radioactivité

D'autres applications

■ dans le domaine alimentaire

L'irradiation de certains aliments permet de les conserver 4 à 5 fois plus longtemps: elle permet ainsi d'inhiber la germination des pommes de terres et des oignons, de ralentir la maturation des tomates et des fraises, de détruire les micro-organismes des épices ou des légumes secs...

■ dans le domaine chirurgical

L'irradiation par les rayons γ est un excellent moyen de destruction, à froid, de certaines bactéries. Le matériel chirurgical (seringues, pansements...) peuvent être stérilisés industriellement de cette manière.

■ dans le domaine industriel

Des jauges radiométriques, qui mesurent l'absorption des rayons γ , sont employées dans les contrôles de qualité des produits industriels. Elles permettent de détecter des défauts dans des pièces mécaniques, de contrôler des épaisseurs, de vérifier des soudures.

■ pour la conservation des œuvres d'art

L'exposition aux rayonnements γ permet de stériliser des œuvres d'art ou d'autres documents précieux, pour une meilleure conservation.

Et encore...

La radioactivité permet aussi d'éliminer l'électricité statique gênante dans l'industrie du tissage et des matières plastiques, de détecter des incendies dans les lieux publics...

Pistes bibliographiques

Les Conseils Solvay et les débuts de la physique moderne, dir. Pierre Marage et Grégoire Wallenborn, Université libre de Bruxelles, 1995, 265 p.

Marie Skłodowska Curie et la Belgique, Université libre de Bruxelles, 1990, 151 p.

Pierre et Marie Curie, Paris, Bibliothèque nationale, 1967, 102 p.

The Solvay Councils and the birth of Modern Physics, dir. Pierre Marage and Grégoire Wallenborn, Basel, Birkhäuser Verlag, 1999, 224 p.

CURIE, M., **Radioactivité et phénomènes connexes**, Paris, E. Chiron, s. d., 24 p.

CURIE, M., **Traité de radioactivité**, Paris, Gauthier-Villars, 1910, 2 v.

CURIE, M., **Pierre Curie**, Paris, Payot, 1924, 111 p.

CURIE, M., **Radioactivité**, Paris, Hermann, 1935, 563 p.

CURIE, M., CHAVANNES, I. et al., **Leçons de Marie Curie: physique élémentaire pour les enfants de nos amis**, s.l., EDP Sciences, 124 p.

CURIE, M., CURIE, I., Œuvres de **Marie Skłodowska Curie**, Varsovie, Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, 1954, 685 p.

CURIE, M., JOLIOT-CURIE, I., **Marie Curie. Pierre Curie. Avec une étude des Carnets de laboratoire** (de Pierre et Marie Curie), Paris, Denoël, 1955, 127 p.

CURIE, M., JOLIOT-CURIE, I., **Correspondance, choix de lettres 1905-1934**, Paris, Ed. français réunis, 1974, 352 p.

QUINN, S., **Marie Curie**, Paris, O. Jacob, 1996, 483 p.

REID, R. W., **Marie Curie: derrière la légende**, Paris, Editions du Seuil, 1983, 345 p.

Références en ligne

<http://www.aip.org/history>

<http://www.aip.org/history/curie>

<http://musee.curie.fr>

<http://www.curie.fr>

<http://www.nbi.dk/NBA/webpage.html>

Conception scientifique

Archives de l'ULB - Aline Duvivier
Infosciences ULB - Virginie Roth

Conception graphique

TERTIO - Cécile Crivellaro et Serge Vandenput

Comité scientifique Infosciences

Pierre Marage, Claudine Buess,
Lucius Bette et Marie-José Gama

Remerciements

Corinne Duckstein et Yvon Molinghen (ULB)

Crédits photographiques

Musée Marie Skłodowska Curie, Varsovie

Ce dossier a été réalisé dans le cadre de l'exposition «Marie Skłodowska Curie, symbole et passion» (3-15 novembre 2003) conçue par l'Université libre de Bruxelles, Tertio (Bruxelles) et Teamwork (Paris).

Cette exposition a pris place au sein de la «Semaine Marie Curie», organisée par la Commission Européenne Direction générale de la Recherche avec le concours du Bureau de liaison Bruxelles-Europe, de la Région de Bruxelles-Capitale, de l'Université libre de Bruxelles et de la Vrije Universiteit Brussel.

Elle a reçu le soutien de: American Institute for Physics Belgian Museum of Radiology - BruDisc - Cambridge University - Hôpital Bordet - Hôpital Erasme - Mac Line VUB ainsi que de nombreuses personnes et services de l'Université libre de Bruxelles.