

5. Introduction à la radioactivité et à son utilisation dans l'industrie

5.1- La radioactivité

La radioactivité naturelle a été découverte par le physicien français Henri Becquerel.

En mars 1896, il remarqua qu'un film photographique conservé dans un emballage opaque, mis à proximité d'uranium, avait réagi. Une fois développé, il présentait le même aspect que s'il avait été accidentellement exposé à la lumière. Il en conclut que l'uranium émettait spontanément et sans s'épuiser des rayonnements invisibles.

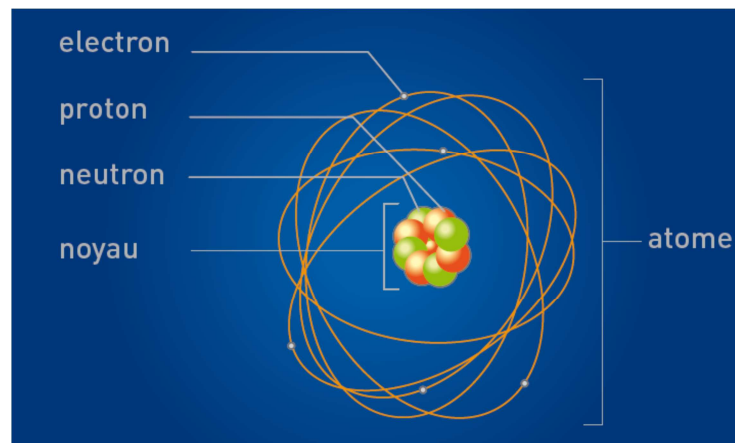


À la suite des travaux d'Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie isolèrent en 1898 le polonium et le radium, des éléments radioactifs inconnus présents dans le minerai d'uranium.

5.1.1- La radioactivité, propriété naturelle de certains atomes

Dans la nature, la plupart des noyaux d'atomes sont stables.

Cependant, certains atomes ont des noyaux instables, ce qui est dû à un excès, soit de protons, soit de neutrons ou encore à un excès des deux. Ils sont dits radioactifs et sont appelés radio-isotopes ou radionucléides. Les noyaux d'atomes radioactifs se transforment spontanément en d'autres noyaux d'atomes, radioactifs ou non. La chaîne se termine toujours par une ultime transformation en atome stable.



Structure de l'atome

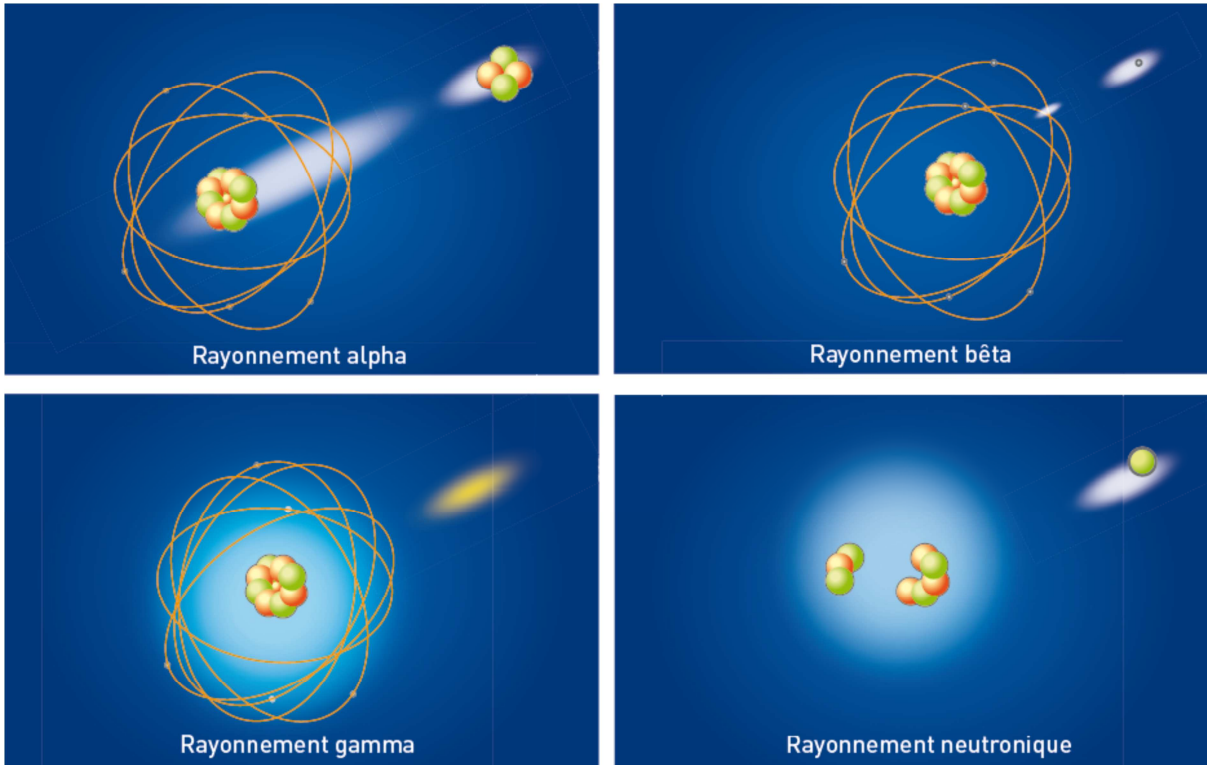
Par exemple, après plusieurs étapes, l'uranium 238 tend à se transformer en une forme stable, le plomb 206. Cette transformation irréversible d'un atome radioactif en un autre atome est appelée désintégration. Elle s'accompagne d'une émission de différents types de rayonnements.

Les caractéristiques chimiques d'un atome sont déterminées par son nombre de protons (ou son nombre d'électrons qui est identique), le nombre de neutrons pouvant être variable. Si un même élément chimique a des représentants avec des nombres de neutrons différents, on parle alors d'isotopes. Par exemple, le carbone a deux isotopes, le « 12 » qui n'est pas radioactif et le célèbre carbone 14. Le numéro représente la somme des neutrons et des protons de l'isotope (6 neutrons et 6 protons pour le carbone 12, 8 neutrons et 6 protons pour le carbone 14).

5.1.2- Les différents rayonnements

La radioactivité s'accompagne d'une émission de particules assimilable à un rayonnement. On rencontre principalement 4 types différents de rayonnement :

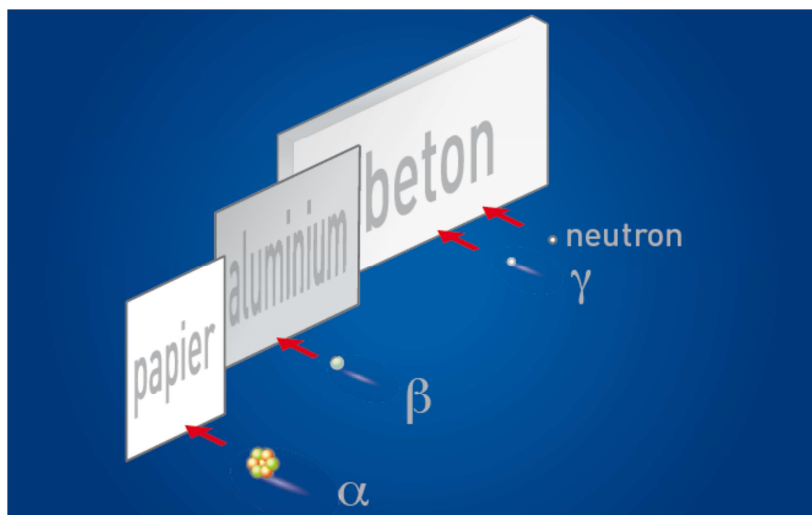
- * le **rayonnement « alpha »** qui est une émission de noyaux d'hélium (2 protons, 2 neutrons) ;
- * le **rayonnement « bêta »** qui est une émission d'électrons ;
- * le **rayonnement « gamma »** qui est une émission de photons (ce sont des « grains » d'énergie, de la même famille que la lumière) ;
- * le **rayonnement neutronique** qui est une émission de neutrons, ce dernier rayonnement ne se rencontre que dans les fissions d'atomes, spontanées ou provoquées.



Les différents rayonnements

Ces rayonnements ont chacun leurs caractéristiques. A forte dose, ils sont tous nocifs. Ils peuvent être arrêtés par différents types et épaisseurs de matériaux :

- * les **rayons « alpha »** sont très peu pénétrants et sont arrêtés par une simple feuille de papier ;
- * les **rayons « bêta »** par une feuille d'aluminium ;
- * les **rayons « gamma » et les neutrons** par une épaisse couche de béton ou plusieurs mètres d'eau.



Caractéristiques des rayonnements

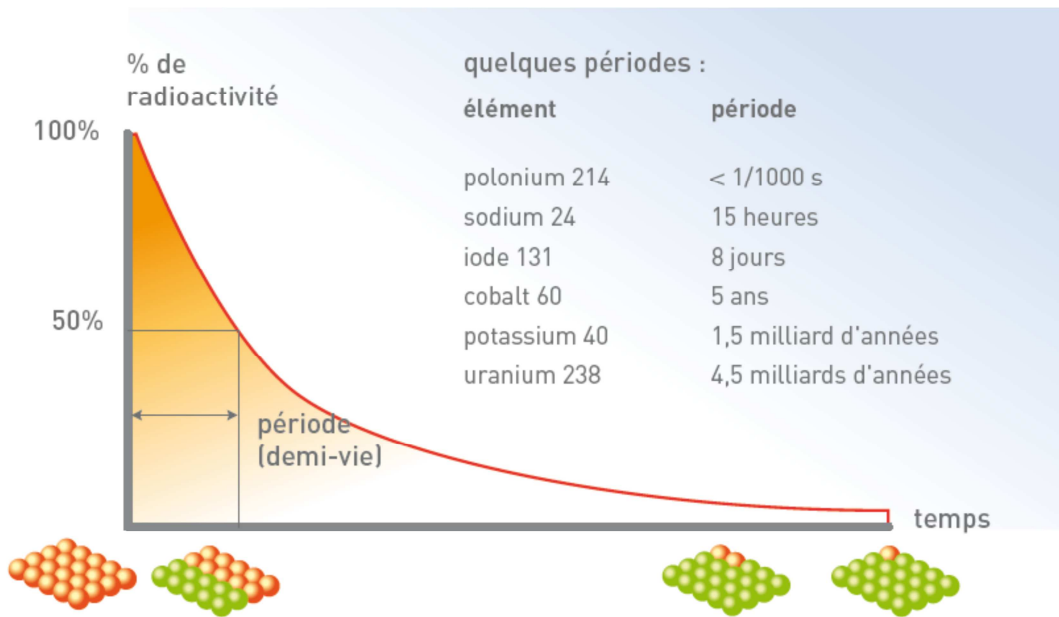
5.1.3- La décroissance naturelle de la radioactivité

Les éléments radioactifs ne se transforment pas instantanément, mais au hasard tout en suivant une loi statistique en fonction du temps. Si l'on considère à un instant donné une grande quantité d'isotopes radioactifs identiques, on s'apercevra qu'au bout d'un temps « T », la moitié se sera transformée, il n'en restera donc plus que la moitié. Au bout de 2 fois « T », il n'en restera plus que le $\frac{1}{4}$ (la moitié de la moitié), au bout de 3 fois « T » le $\frac{1}{8}$, etc. Au bout de 10 fois « T », il n'en reste plus qu'un millième environ (exactement $\frac{1}{1024}$).

« T » est appelé la **période radioactive**, elle est caractéristique d'un isotope donné et peut être très variable, d'une fraction de seconde à plusieurs milliards d'années, selon l'isotope considéré.

18

Pièce 0



La décroissance naturelle de la radioactivité

5.1.4- La réaction en chaîne, la criticité et l'enrichissement de l'uranium

Certains atomes sont assez fragiles et peuvent se casser (on parle de fission de l'atome) s'ils sont percutés par d'autres éléments, le plus souvent un neutron. Dans certaines conditions, ce phénomène peut conduire à une **réaction en chaîne**. Celle-ci se produit lorsqu'un neutron cause la fission d'un atome fissile produisant un plus grand nombre de neutrons qui à leur tour causent d'autres fissions. Une réaction en chaîne non contrôlée, qui se produit avec une quantité suffisamment importante de combustible fissile (masse critique) peut mener à une explosion d'énergie, c'est le principe d'une bombe atomique. La réaction en chaîne peut aussi être contrôlée et utilisée dans un réacteur nucléaire pour produire de l'énergie.

Le schéma ci-contre illustre le principe de la réaction en chaîne qui se produit dans les réacteurs nucléaires qui produisent de l'électricité en France.

① Un atome d'uranium-235 absorbe un neutron, et se divise en 2 nouveaux atomes (produits de fission), relâchant 3 nouveaux neutrons et de l'énergie.

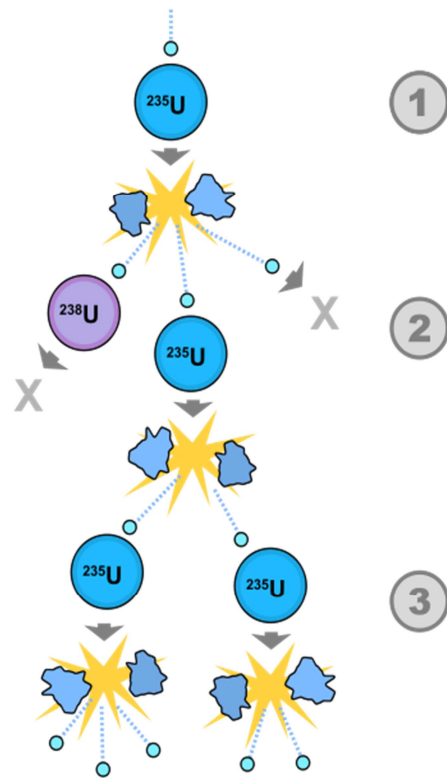
② L'un des neutrons est absorbé par un atome d'uranium-238, et ne continue pas la réaction. Un autre neutron est simplement perdu et ne continue pas la réaction. Cependant, un neutron rentre en collision avec un atome d'uranium-235, qui se divise et relâche deux neutrons et de l'énergie.

③ Ces deux neutrons entrent en collision avec des atomes d'uranium-235, qui se divisent et relâchent de 1 à 3 neutrons, qui peuvent encore entretenir la réaction.

Selon le milieu dans lequel se déroule la réaction en chaîne, celle-ci peut être :

- × **sous-critique** : elle finit par s'éteindre d'elle-même car trop de neutrons produits sont perdus et il n'en reste plus assez pour entretenir la réaction ;
- × **critique** : il y a autant de neutrons utiles produits que de neutrons servant à la fission ;
- × **sur-critique** : il y a plus de neutrons utiles produits que de neutrons servant à la fission.

Les réacteurs nucléaires sont critiques lorsqu'ils fonctionnent à puissance constante. Tous les autres milieux où se trouvent de la matière fissile sont toujours maintenus largement sous-critiques pour éviter qu'une réaction en chaîne non souhaitée se déclenche, par exemple en concentrant trop de matière fissile en un seul endroit. Des calculs de physique nucléaire permettent de garantir qu'un milieu contenant de la matière fissile restera sous-critique ou pas. Le principe est assez simple, il suffit de jouer sur les quantités de matière fissile, leur concentration et les conditions géométriques de leur entreposage.



Très tôt, les scientifiques se sont aperçus qu'un des isotopes de l'uranium était très propice à la réaction chaîne : l'uranium 235. Malheureusement, celui-ci est présent à l'état naturel en de très faibles proportions dans le minerai d'uranium ; son abondance naturelle est de 0,716 %, l'uranium naturel étant constitué à 99,284 % d'uranium 238. Les réacteurs nucléaires d'EDF ne pourraient pas fonctionner avec de l'uranium naturel ; ils resteraient en permanence largement sous-critiques et il serait impossible de déclencher la réaction en chaîne. Il est nécessaire « d'enrichir » l'uranium pour en faire du combustible, c'est-à-dire d'augmenter sa proportion en uranium 235. C'est une opération très complexe, car les deux uraniums, 235 et 238, ont exactement les mêmes propriétés chimiques ; on utilise leur légère différence de masse (l'uranium 235 est un peu plus léger). Actuellement les réacteurs nucléaires d'EDF utilisent de l'uranium enrichi à 3-4%. Les armes nucléaires de fission nécessitent un taux d'enrichissement en uranium 235 beaucoup plus élevé (supérieur à 80%).

5.1.5- Les principales unités de la radioactivité

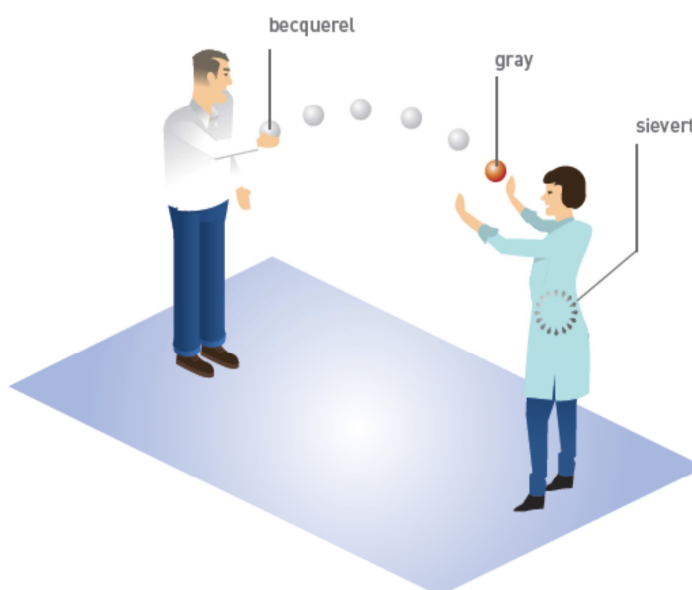
Les trois principales unités de la radioactivité sont le :

- * **becquerel (Bq)** qui exprime la quantité de radioactivité ;
- * **gray (Gy)** qui mesure son énergie ;
- * **sievert (Sv)** qui en quantifie les effets.

Ces trois unités sont nécessaires pour définir complètement un rayonnement radioactif.

L'image ci-contre, où une personne envoie des balles à une autre, permet de faire l'analogie avec la radioactivité et de symboliser la relation entre les trois unités de mesure.

- * le nombre de balles envoyés peut se comparer au becquerel (**quantité de radioactivité**) ;
- * la force avec laquelle les balles sont envoyées peut se comparer au gray (**énergie reçue**) ;



- * les marques laissées sur le corps selon la nature des balles en mousse ou en matériau plus dur au sievert (**effet produit**).

5.1.5.1 Le becquerel

Un échantillon radioactif se caractérise par son activité qui est le nombre de désintégrations de noyaux radioactifs par seconde qui se produisent en son sein. L'unité d'activité est le becquerel, de symbole Bq.

1 Bq = 1 désintégration par seconde

Cette unité est très petite. L'activité s'exprimera donc le plus souvent en multiples du becquerel :

- × le kilobecquerel (kBq) = 1 000 Bq ;
- × le mégabecquerel (MBq) = 1 million de Bq ;
- × le gigabecquerel (GBq) = 1 milliard de Bq ;
- × le térabecquerel (TBq) = 1 000 milliards de Bq.

Pour détecter et mesurer les rayonnements émis par les isotopes radioactifs, on dispose de différents types de détecteurs extrêmement sensibles qui mesurent couramment des activités plus d'un million de fois inférieures aux niveaux qui pourraient avoir des effets sur notre santé.

Quelques exemples d'activité radioactive naturelle de notre environnement :

- × le **granite** : 1 000 becquerels par kg ;
- × le **corps humain** : un individu de 70 kg a une activité de l'ordre de 8 000 becquerels, dont environ 5 000 becquerels dus au potassium 40 (dans les os) ;
- × le **lait** : 80 becquerels par litre ;
- × l'**eau de mer** : 10 becquerels par litre.

5.1.5.2 Le gray

Le gray est l'unité de mesure de l'énergie des rayonnements. Elle permet d'apprécier la quantité de rayonnements absorbés ou dose absorbée - par un organisme ou un objet exposé aux rayonnements.

5.1.5.3 Le sievert

Les effets biologiques des rayonnements sur un organisme exposé se mesurent en sievert (symbole Sv). L'unité la plus courante est le millisievert, ou millième de sievert (mSv).

A titre indicatif, on évalue l'effet sur l'Homme de la radioactivité naturelle en France à une moyenne de 2,4 mSv par an. Cette valeur n'est qu'une moyenne, elle est moins élevée dans les régions calcaires et un peu plus dans les régions granitiques. Dans certaines régions du monde (notamment en Inde, dans le Kérala), elle peut s'élever jusqu'à 70 mSv.

5.1.6- Les isotopes radioactifs naturels

Lors de la formation de la Terre, il y a environ 5 milliards d'années, la matière comprenait des atomes stables et instables. Mais depuis, les atomes instables se sont désintégrés par radioactivité et la plupart d'entre eux ont fini par atteindre la stabilité. Cependant, il existe toujours quelques atomes radioactifs naturels :

- * les radio-isotopes caractérisés par une très longue période comme l'uranium 238 (4,5 milliards d'années) et le potassium 40 (1,5 milliard d'années). Ils n'ont pas encore eu le temps de tous se désintégrer depuis qu'ils ont été créés ;
- * les descendants radioactifs des précédents comme le radium 226 qui résulte de désintégration de l'uranium 238. Le radium 226 se transforme lentement en un gaz lui-même radioactif, le radon 222 ;
- * les radio-isotopes créés par l'action des rayonnements cosmiques sur certains noyaux d'atomes. C'est le cas, par exemple, du carbone 14 qui se forme en permanence dans l'atmosphère.

Ces isotopes radioactifs naturels sont présents sur toute la planète, dans l'atmosphère (carbone 14, radon 222), dans la croûte terrestre (uranium 238 et uranium 235, radium 226...) et dans notre alimentation (potassium 40).

5.1.7- Les isotopes radioactifs artificiels

Ils sont produits soit dans un réacteur nucléaire, soit dans des accélérateurs de particules où l'on accélère des particules pour les faire se percuter avec des atomes. Soit les particules sont absorbées, soit elles font exploser l'atome.

Certains isotopes (cobalt 60, iridium 192...) sont utilisés comme source de rayonnements pour des radiographies gamma (de la même famille que les radiographies classiques, mais beaucoup plus pénétrantes) ou comme source d'irradiation pour la radiothérapie ou pour des applications industrielles.

Dans les réacteurs nucléaires, les atomes sont brisés par des neutrons, on appelle cette réaction « la fission » qui produit d'autres atomes, les fragments de la fission. Ces nouveaux atomes sont le plus souvent radioactifs (par exemple strontium 90, césium 137...). Certains ne sont pas utilisés et font partis des déchets radioactifs. Les réacteurs nucléaires sont le plus souvent utilisés pour la production d'électricité.

5.2- L'Homme et la radioactivité

5.2.1- Le risque

L'Homme est exposé en permanence aux rayonnements, par exemple à ceux du soleil. La lumière s'accompagne de rayonnements invisibles connus sous le nom de rayonnements ultraviolets et infrarouges.

L'Homme est également exposé à d'autres rayonnements invisibles de très forte énergie qui proviennent de l'espace, les rayonnements cosmiques.

Les rayonnements les plus énergétiques arrachent les électrons aux atomes sur leur trajectoire qui se chargent alors positivement. Les atomes voisins qui accueillent les électrons se chargent négativement. Les atomes chargés positivement ou négativement sont appelés ions. Les rayonnements capables de provoquer de telles réactions sont dits ionisants et le phénomène s'appelle l'ionisation. Cette ionisation peut endommager les cellules vivantes.

Les effets des rayonnements ultraviolets du soleil sont connus de tous. Si, à faibles doses, ils apparaissent assez inoffensifs, à forte dose, ils peuvent présenter des dangers. Par exemple, des expositions prolongées au soleil provoquent des coups de soleil, des brûlures dues à la présence des rayonnements ultraviolets. À long terme, elles peuvent même être la cause de cancers.

Selon la dose reçue et le type de rayonnements, leurs effets peuvent être plus ou moins néfastes pour la santé, immédiats ou différés :

- × une **forte exposition aux rayonnements ionisants** (de l'ordre de 1 Sv) provoque des effets immédiats sur les organismes vivants comme, par exemple, des brûlures plus ou moins importantes pouvant conduire, dans le cas de très fortes expositions (plusieurs dizaines de Sievert), à une issue fatale ;
- × les **expositions à des doses plus ou moins élevées** de rayonnements ionisants peuvent avoir des effets à long terme (jusqu'à plusieurs d'années) sous la forme de cancers et de leucémies. Ces effets se manifestent de façon non systématique, on ne peut pas les prédire pour une personne donnée.

Les rayonnements alpha, qui sont de grosses particules (noyaux d'hélium), sont rapidement freinés lorsqu'ils pénètrent à l'intérieur d'un matériau ou d'un tissu vivant et déposent leur énergie localement. Ils sont donc, à dose absorbée égale, plus perturbateurs que des rayonnements gamma, lesquels pénètrent plus profondément la matière et étalent ainsi leur dépôt d'énergie.

Le risque biologique n'est pas uniforme pour l'ensemble de l'organisme. Il dépend de la radiosensibilité de l'organe exposé et du type de rayonnement. On peut ainsi, pour des raisons thérapeutiques, exposer un organe à un rayonnement très concentré et très important et guérir le malade, alors que si ce rayonnement était dirigé sur tout le corps ou sur des organes plus sensibles, il tuerait le patient.

5.2.2- Les modes d'exposition aux rayonnements

Selon la manière dont les rayonnements atteignent l'organisme, on distingue deux modes d'exposition : externe ou interne.

L'exposition externe aux rayonnements (ou **irradiation externe**) se produit quand on se trouve à proximité de substances radioactives sous forme de nuage ou de dépôt sur le sol ou encore de sources à usage industriel ou médical. L'exposition externe peut concerner tout l'organisme ou une partie seulement de celui-ci. Elle cesse dès que l'on n'est plus sur la trajectoire des rayonnements (cas par exemple d'une radiographie du thorax).

L'exposition interne (encore appelée **contamination interne**) se produit quand des substances radioactives se trouvent à l'intérieur de l'organisme. Celles-ci provoquent une irradiation interne. Les substances ont pu pénétrer par inhalation, par ingestion, par blessure de la peau et se distribuent ensuite dans l'organisme. L'exposition ne cesse que lorsque les substances radioactives ont disparu de l'organisme après un temps plus ou moins long par élimination naturelle et décroissance radioactive ou par traitement. Tous les radioéléments ne sont pas éliminés naturellement (respiration, urines...) à la même vitesse. Certains peuvent s'accumuler dans des organes spécifiques (os, foie...) avant d'être évacués du corps. Pour chacun des éléments radioactifs, on définit, en plus de sa période radioactive, une période biologique, temps au bout duquel la moitié de l'activité d'une substance radioactive a été éliminée de l'organisme, par des voies naturelles.

EXPOSITION INTERNE

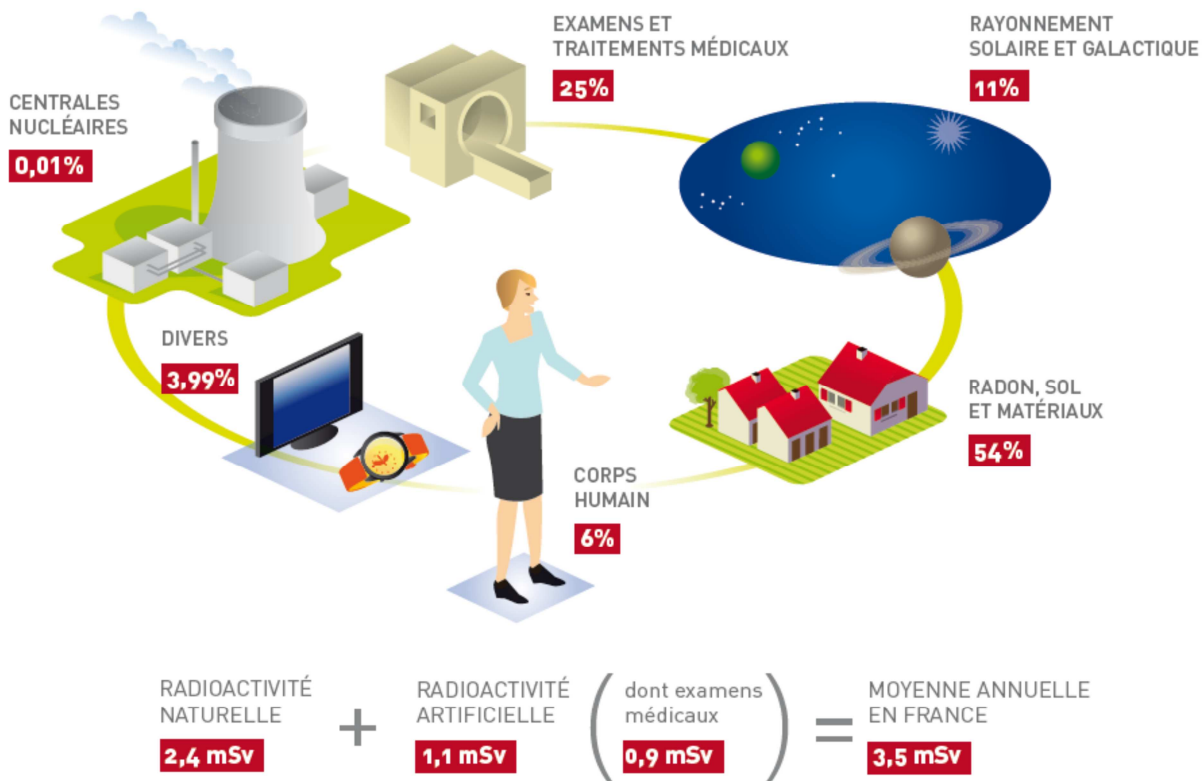


EXPOSITION EXTERNE



5.2.3- L'exposition de l'Homme aux rayonnements ionisants

En France, l'exposition annuelle de l'Homme aux rayonnements ionisants est en moyenne de 3,5 milliSievert. Les rayonnements artificiels sont du même type que ceux émis par des sources naturelles et leurs effets sur de la matière vivante sont, à dose égale, identiques. Ce sont essentiellement les radiographies médicales ou dentaires.



Exposition de l'Homme aux rayonnements

5.2.4- La radioprotection

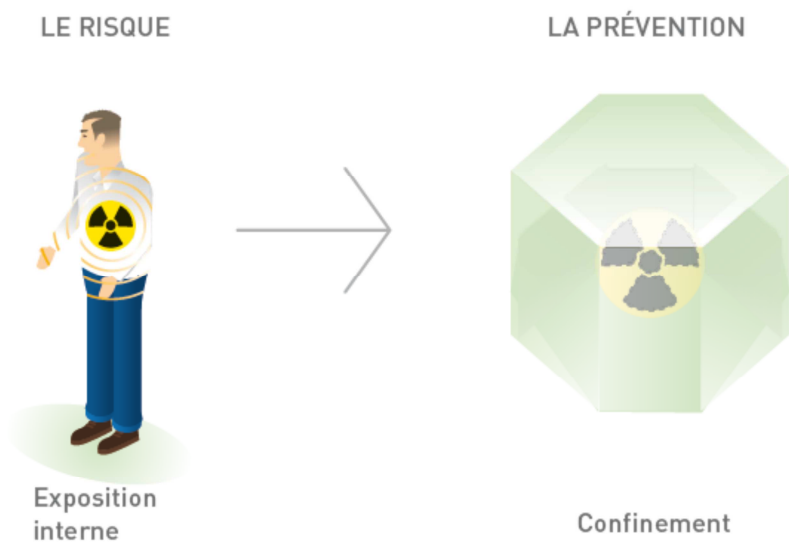
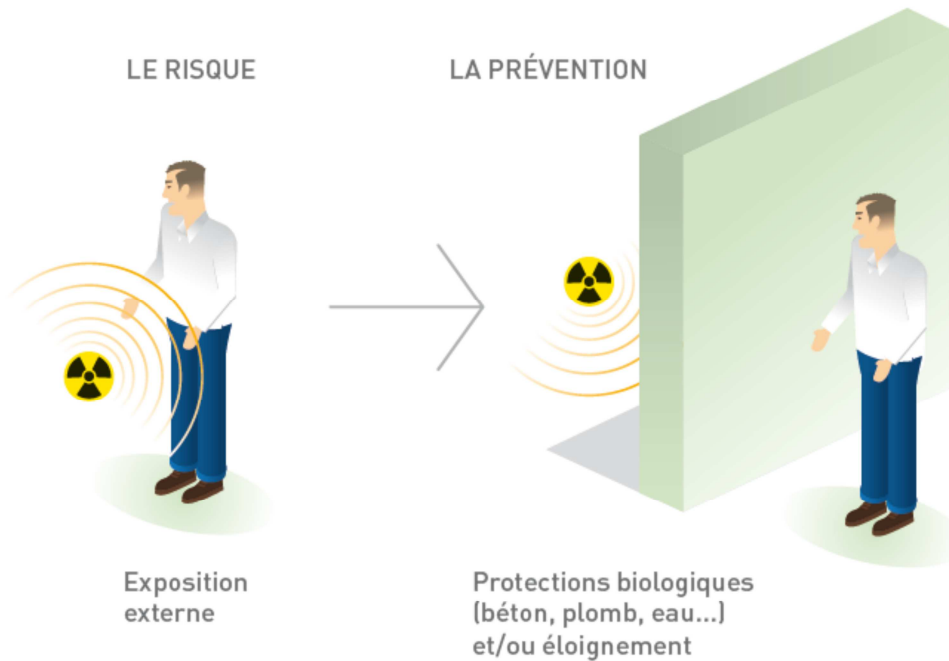
Pour se prémunir des risques d'exposition externe, il faut :

- × **s'éloigner de la source** de rayonnements, car leur intensité diminue avec la distance ;
- × mettre un ou plusieurs **écrans** entre la source de rayonnements et les personnes (murs de béton, parois en plomb et verres spéciaux chargés en plomb).

C'est une des raisons pour lesquelles les installations nucléaires sont en général aussi massives.

D'autre part, il faut réduire au strict minimum indispensable la durée d'exposition des travailleurs aux rayonnements. Pour cela, une méthode de travail a été mise au point, elle est appelée ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*), « aussi faible que raisonnablement possible ».

Il s'agit pour toute intervention conduisant à une exposition aux rayonnements de faire la preuve qu'il n'existe pas d'autre solution raisonnablement possible pour diminuer encore l'exposition des travailleurs. Dans tous les cas, l'exposition des travailleurs est limitée.



Prévention d'une exposition interne et externe

Chaque intervention est minutieusement préparée de manière à ne pas perdre de temps. Pour les interventions les plus délicates, on peut aller jusqu'à construire une maquette, grandeur réelle, pour que les opérateurs puissent répéter autant que nécessaire les gestes qu'ils auront à faire. On fait également de plus en plus appel à la réalité virtuelle. Cependant les interventions qui nécessitent ce genre de dispositions sont très rares.

Pour se prémunir des risques d'exposition interne, il faut empêcher par tous les moyens possibles que les produits radioactifs rentrent en contact avec l'Homme. Deux moyens existent : le confinement et les protections individuelles s'il est nécessaire de pénétrer dans une zone confinée.

5.3- Les normes de radioprotection

La prise de conscience du risque d'une exposition excessive aux rayonnements ionisants a amené les autorités à fixer des normes réglementaires. Ces limites correspondent à un risque supplémentaire minimale par rapport au risque naturel, ce qui le rend acceptable.



INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION

Depuis 1928, la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR, ICPR en anglais) rassemble des médecins, physiciens, biologistes, etc de tous pays. Cette autorité scientifique indépendante émet des avis en matière de radioprotection, guides pour les réglementations propres à chaque État.



L'UNSCEAR (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*) réunit des scientifiques représentant 21 nations. Il a été créé en 1955 au sein de l'ONU pour rassembler le

maximum de données sur les niveaux d'exposition dus aux diverses sources de rayonnements ionisants et leurs conséquences biologiques, sanitaires et environnementales. Il constitue un bilan régulier de ces données, mais également une évaluation des effets en étudiant les résultats expérimentaux, l'estimation des doses, les données humaines.



L'Union européenne reprend ces avis dans ses propres normes ou directives. La limite de dose est de 1 milliSievert par an pour la population et de 20 milliSievert par an en moyenne sur 5 ans pour les travailleurs qui sont soumis à un contrôle médical spécifique

Le législateur divise par vingt les doses admissibles des travailleurs pour la population car il considère que celle-ci comporte des sujets de tous âges, de tous états de santé et qui ne sont pas suivis médicalement.