

LA RADIOACTIVITE

1. Le noyau de l'atome

1.1 Composition d'un noyau atomique

Le noyau est composé de nucléons : les protons et les neutrons.

On appelle **nombre de masse A** le nombre de nucléons d'un noyau, et **nombre de charge Z** le nombre de protons de ce noyau. Le nombre de neutrons du noyau est donc :
 $N = A - Z$.

Représentation d'un noyau de l'élément X : A_ZX

1.2 Isotopie

Deux noyaux d'un même élément chimique peuvent différer par leur nombre de nucléons : ce sont des **isotopes**. Ils possèdent donc le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent.

(exemples : les isotopes du carbone : ${}^{12}_6C$; ${}^{13}_6C$; ${}^{14}_6C$)

2. La radioactivité

2.1 Définition

On appelle radioactivité l'émission spontanée, par certains noyaux, de particules, parfois accompagnées de rayonnement électromagnétique.

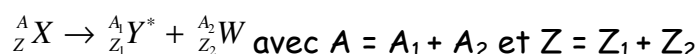
Les noyaux d'atomes radioactifs sont instables et se transforment spontanément en d'autres noyaux d'atomes, radioactifs ou non. Cette transformation d'un atome radioactif en un autre atome est appelée désintégration nucléaire et elle s'accompagne de l'émission de particules (α , β^- ou β^+) ainsi que d'un rayonnement gamma.

2.2 Réactions nucléaires et lois de conservation

Pour décrire une transformation nucléaire, on utilise une équation concernant ici uniquement les noyaux atomiques et devant vérifier les lois de conservation :

- du nombre de charge
- du nombre de masse

Dans le cas général, on peut donc écrire :



où X correspond au symbole du noyau « père » radioactif, Y^* à celui du noyau « fils excité » et W à celui de la particule émise.

La désexcitation du noyau fils pourra se traduire par l'équation : ${}^A_{Z_1}Y^* \rightarrow {}^A_{Z_1}Y + \gamma$

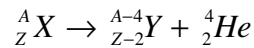
Cette désexcitation est accompagnée par l'émission d'un rayonnement électromagnétique. Il y a émission de rayons gamma γ .

3. Les principales désintégrations radioactives

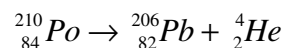
3.1 La radioactivité α

La radioactivité alpha α correspond à l'émission de noyaux d'hélium (deux protons et deux neutrons) ; ils sont très peu pénétrants et peuvent donc être arrêtés par une feuille de papier ou par les couches superficielles de la peau mais sont très ionisantes. Ce type de rayonnement intervient pour les noyaux lourds.

Le bilan d'une désintégration α peut s'écrire :



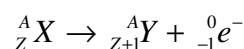
Exemple : Le polonium 210 est radioactif α . Ecrire le bilan de la désintégration



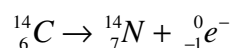
3.2 La radioactivité β^-

La radioactivité β^- correspond à l'émission d'électrons, il affecte les noyaux présentant un excès de neutrons ($N > Z$). Les rayons bêta moyennement pénétrants peuvent traverser les couches superficielles de la peau mais sont arrêtés par quelques millimètres de métal.

Le bilan d'une désintégration β^- peut s'écrire :



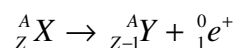
Exemple : Le carbone 14 est radioactif β^- . Ecrire le bilan de la désintégration



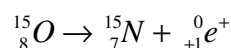
3.3 La radioactivité β^+

La radioactivité β^+ correspond à l'émission de positrons (même masse que l'électron mais de charge opposée), il ne concerne que les noyaux artificiels qui possèdent trop de protons par rapport aux neutrons ($N < Z$).

Le bilan d'une désintégration β^+ peut s'écrire :



Exemple : L'oxygène 15 est radioactif β^+ . Ecrire le bilan de la désintégration

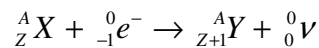


3.4 La capture électronique

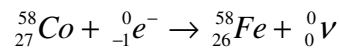
Tout comme la radioactivité β^+ , la radioactivité par capture électronique (CE) concerne les nucléides instables présentant un excès de protons par rapport aux neutrons.

Les noyaux de ce type peuvent se désintégrer, selon les cas, soit par désintégration β^+ uniquement, soit par capture électronique uniquement, soit par l'un ou l'autre de ces processus avec une certaine probabilité pour chacun. Au cours de la capture électronique, il y a émission d'un neutrino ${}^0_0\nu$.

Le bilan d'une capture électronique peut s'écrire :



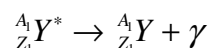
Exemple : Le cobalt 58 peut se désintégrer par capture électronique. Ecrire le bilan de la désintégration



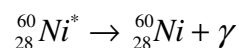
3.5 La radioactivité γ

En général, les noyaux formés se retrouvent dans un état excité : ils sont dans un état énergétique trop élevé ; pour retrouver leur état fondamental, de faible énergie, il y a émission de rayonnement gamma, rayonnement électromagnétique de même nature que la lumière, mais beaucoup plus énergétique. De ce fait, les rayons gamma sont très pénétrants : pour arrêter certains d'entre eux, plusieurs dizaines de centimètres de plomb ou plusieurs mètres de béton sont nécessaires.

Le bilan d'une désintégration γ peut s'écrire :



Exemple : Ecrire le bilan de la désexcitation du nickel 60 qui passe à son état fondamental en émettant un photon gamma :



4. Loi de décroissance radioactive et activité d'une source

4.1 Enoncé de la loi

La désintégration des noyaux radioactifs au niveau microscopique est aléatoire mais au niveau macroscopique, le nombre moyen N de noyaux restants dans l'échantillon suit une loi déterminée appelée loi de décroissance radioactive, définie par :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

λ étant une constante de désintégration radioactive, représentant la proportion de noyaux qui se désintègrent par unité de temps : elle s'exprime en s^{-1} si t s'exprime en s. N(t) est le nombre de noyaux restants radioactifs à l'instant t et N_0 le nombre de noyaux étant radioactif à l'instant initial t = 0.

4.2 Période radioactive

La période $t_{1/2}$ ou T d'un noyau radioactif est le temps nécessaire à la désintégration de la moitié des noyaux présents dans un échantillon de ce noyau.

Cette période ne dépend que de la nature de l'échantillon, elle est très différente d'un noyau à l'autre.

4.3 Relation entre λ et T

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{or} \quad \text{à } t = t_{1/2}, N = \frac{N_0}{2}$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \quad \text{donc} \quad \ln \frac{1}{2} = -\lambda \times t_{1/2}$$

$$-\ln 2 = -\lambda \times t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

4.4 Activité d'une source radioactive

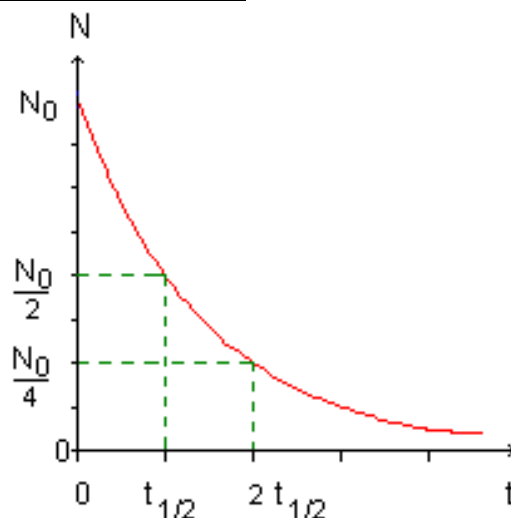
L'activité, notée A , d'une source radioactive est égale au nombre moyen de désintégrations par seconde. L'unité de l'activité est le becquerel Bq : 1Bq = 1 désintégration par seconde.

$$A = \lambda N$$

Comme N , A décroît exponentiellement en fonction du temps.

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

4.5 Courbe de décroissance radioactive



Le nombre de noyaux radioactifs ou l'activité est divisé par deux au bout de chaque période radioactive.

5. Energie libérée au cours d'une désintégration radioactive

5.1 L'unité de masse atomique

Comme pour l'énergie, l'unité de masse du système internationale, n'est pas adaptée à l'échelle atomique ; on définit alors l'unité de masse atomique u : elle correspond à $1/12$ de la masse d'un atome de carbone 12.

$$1 u = \frac{1}{12} \times \frac{M(^{12}\text{C})}{N_A} = \frac{1}{12} \times \frac{M(^{12}\text{C})}{6,02214 \cdot 10^{23}} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

5.2 Relation d'Einstein

En 1905, Albert Einstein postule « l'équivalence masse-énergie » : tout corps au repos, possède, du seul fait de sa masse, l'énergie :

$$E = mc^2$$

L'énergie s'exprimant en joule (J), la masse m en kg et c est la célérité de la lumière dans le vide ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

5.3 Energie libérée

Lors d'une réaction nucléaire, la masse des produits obtenus est inférieure la masse des réactifs. La masse manquante est appelée perte de masse ou défaut de masse. Elle a pour expression :

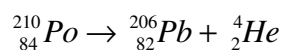
$$|\Delta m| = |m_{\text{produits}} - m_{\text{réactifs}}|$$

D'après la relation d'Einstein, l'énergie libérée a pour expression :

$$E_{\text{libérée}} = |\Delta m| \times c^2$$

Exemple : Le polonium 210 est radioactif α . Ecrire le bilan de la désintégration et calculer l'énergie libérée par la désintégration α .

Données : Masse de ^{210}Po = 209,9368 u
Masse de ^{206}Pb = 205,9295 u
Masse de ^4_2He = 4,00150 u
 $1 u = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ et $1 \text{ Mev} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$



$$|\Delta m| = |m_{\text{produits}} - m_{\text{réactifs}}| = |205,9295 + 4,00150 - 209,9368| = 5,8 \times 10^{-3} u$$

$$E_{\text{libérée}} = |\Delta m| \times c^2 = 5,8 \times 10^{-3} \times 1,66 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = 8,66 \times 10^{-13} \text{ J} = 5,4 \text{ Mev}$$

6. Mesure de la radioactivité d'un échantillon.

Pour mesurer la radioactivité et ses effets, trois unités sont utilisées pour évaluer trois types de grandeurs : le nombre des désintégrations, l'énergie radioactive absorbée et ses effets biologiques.

6.1 Mesure de la radioactivité : le becquerel

Le Becquerel (Bq) est l'unité de mesure de la radioactivité d'un corps. Elle caractérise le nombre de désintégrations spontanées de noyaux d'atomes instables qui s'y produit par seconde. Plus l'activité d'un élément instable est forte, plus sa radioactivité est puissante. 1Bq = 1 désintégration par seconde

6.2 Mesure de la dose absorbée : le gray (Gy)

Si une personne se trouve dans une pièce où sont présents des atomes instables, seule une partie de la radioactivité ambiante l'atteindra. Cette partie est exprimée par l'unité « gray ». Le gray (Gy) est l'unité qui permet de mesurer la quantité de rayonnement absorbé (appelée dose absorbée) par un corps exposé à de la radioactivité lors d'expositions ponctuelles accidentelles ou liées à un traitement médical. Il correspond à la quantité d'énergie communiquée à un corps par unité de masse exposée.

1 Gy = 1 joule par kilo de matière irradiée

$$D = \frac{E}{m}$$

D : dose d'énergie absorbée en grays (Gy)

E : énergie reçue en joule (J)

m : masse irradiée en kilogrammes (kg)

6.3 Mesure des effets biologiques : le sievert (Sv)

Le Sievert (Sv) est utilisé pour exprimer les effets biologiques des rayonnements ionisants sur la matière vivante. Les effets de la radioactivité sur les tissus vivants, à dose absorbée égale (mesurée en Gray), varient significativement suivant la nature du rayonnement incident. Par exemple, l'impact du rayonnement alpha, à énergie égale, est le double de celui des rayonnements bêta et gamma.

Pour traduire les différences d'efficacité biologique des rayonnements selon leur nature, on introduit un facteur de pondération radiologique W_R qui relie la dose absorbée D à l'équivalent de dose H, permettant une comparaison directe des risques de dommages causés aux tissus biologiques.

$$H = D \times W_R$$

H : équivalent dose en sieverts (Sv)

D : dose d'énergie absorbée en grays (Gy)

W_R : facteur de pondération qui permet de tenir compte de la nature des rayonnements et de leurs effets sur les tissus du corps humain (1 pour les rayons γ et 20 pour les particules α)

6.4 Appareils de mesure

La radioactivité est imperceptible par l'homme. Plusieurs instruments spécialisés peuvent être utilisés pour la mesurer dans un lieu ou sur une personne. Tous reposent sur le même fonctionnement technique : ils mesurent le nombre d'ionisations (arrachements d'électrons aux atomes) et d'excitations (transmissions d'énergie aux atomes qui passent à un état excité) provoquées par les rayonnements radioactifs qui traversent le détecteur de l'instrument de mesure.

Les instruments de mesures peuvent généralement être regroupés en quatre catégories :

- les dosimètres, mesurant l'exposition externe d'un individu aux rayonnements (dosimètre photographique, dosimètre thermoluminescent)
- les détecteurs de rayonnements bêta et gamma (compteur Geiger-Müller) ;
- les détecteurs de rayonnements alpha (compteurs proportionnels à courant gazeux) ;
- les détecteurs de neutrons.

Dans l'industrie nucléaire, le compteur Geiger est très souvent utilisé. Il permet au personnel de l'industrie nucléaire de s'assurer du bon respect de la réglementation en termes de radioactivité.

7. Les dangers de la radioactivité et prévention

7.1 Radioactivité et corps humain

Le corps humain peut être soumis aux rayonnements radioactifs par :

- irradiation externe. Les rayonnements sont émis par une source externe à l'organisme. Cette irradiation peut être totale ou partielle (un ou plusieurs organes ou tissus). C'est le cas, par exemple, lors d'une radio diagnostique.
- contamination. Les rayonnements sont émis par une source interne à l'organisme (ingestion ou inhalation de substances radioactives). Cela peut se produire lors d'examen médicaux (absorption de radionucléides).

7.2 Les règles de radioprotection

Les mesures de protection de limiter les risques liés à la radioactivité :

- se tenir éloigné des sources radioactives
- utiliser des écrans protecteurs (béton, plomb ...)
- limiter la durée d'exposition

8. Les traceurs radioactifs

8.1 Principe

Les propriétés chimiques d'un isotope radioactif sont identiques à celles d'un isotope stable, à la seule différence que le radio-isotope est instable. Cette instabilité provoque la désintégration qui se traduit par l'émission de rayonnements. Des outils de détection de ces rayonnements permettent de suivre ces radio-isotopes.

Par exemple, le potassium 40 qui est mélangé au potassium stable dans notre alimentation va suivre exactement le même trajet dans notre corps que ses isotopes stables. La détection des rayonnements émis par le potassium 40 permet alors de suivre à la trace le déplacement de l'ensemble du potassium. Un radio-isotope peut donc servir de traceur.

Il est aussi possible de connaître la localisation d'une molécule par le même principe. Cette dernière est marquée par un radio-isotope qui lui sert d'étiquette. Le marquage peut être effectué de deux manières :

- remplacement d'un atome de la molécule par un de ses isotopes radioactifs

- accrochage à la molécule d'un atome radioactif.

La molécule marquée est alors un traceur.

On utilise cette méthode en médecine pour suivre l'action d'un médicament, par exemple. Le traceur est utilisé en très petites quantités. Les effets des rayonnements radioactifs ne sont ainsi pas dangereux à ces très faibles doses. De plus, la période de ces isotopes est courte (de quelques minutes à quelques jours) et ils disparaissent très rapidement de notre corps.

8.2 Application des traceurs en médecine

Les possibilités offertes par les applications des traceurs et de la radioactivité en recherche biologique et en médecine ont été l'un des facteurs essentiels du progrès médical au cours du XXe siècle.

Ainsi, par exemple, des isotopes ont permis, à Avery en 1943, de montrer que l'ADN était le support de l'hérédité. Dans les années qui ont suivi, ils ont conduit à l'avènement de la biologie moléculaire avec la détermination du code génétique, la caractérisation des réactions chimiques assurant le fonctionnement cellulaire ou encore la compréhension des mécanismes énergétiques.

Par ailleurs, des techniques utilisant la radioactivité élargissent les possibilités de diagnostic pour détecter et mieux guérir les maladies: c'est la médecine nucléaire. Au lieu de faire passer les rayonnements à travers l'ensemble du corps comme dans la radiographie, on introduit dans l'organisme une petite quantité de produit marqué par un radio-isotope émetteur de rayonnements gamma ou de rayonnements bêta plus donnant ensuite des rayonnements gamma. Ce produit reconnaîtra certaines cellules de l'organisme et indiquera si elles fonctionnent correctement.

Par exemple, le thallium 201 permet d'observer directement le fonctionnement du cœur et de voir s'il présente des signes de faiblesse.

D'autres types d'examen détecteront la présence de tumeurs dans les os.

Les chercheurs utilisent aussi la médecine nucléaire pour comprendre le fonctionnement des organes. Par exemple, pour le cerveau, les techniques mises en œuvre permettent d'observer directement les parties de celui-ci impliquées dans la vision, la mémorisation, l'apprentissage des langues ou le calcul mental.

En recherche, le marquage d'une molécule (médicaments, produits énergétiques...) permet de suivre son devenir dans la cellule ou dans l'organisme. Cela permet de concevoir des médicaments.