

**Pour les élèves de 6B, 6C et 6D Phys 1H**

Bonjour à tous, je vous envoie la fin du cours de physique. Ce n'est pas une partie trop compliquée. Ce serait bien de prendre la peine de la lire attentivement. Vous pouvez me contacter, je pourrai répondre à vos questions.

N'oubliez pas le contrôle à la rentrée (si on rentre évidemment)

# PHENOMENES NUCLEAIRES

## 1. Structure de l'atome. Constitution du noyau

En 1910, Rutherford a montré l'existence de noyaux atomiques extrêmement petits où se trouve concentrée la quasi totalité de la masse de l'atome et une charge électrique positive  $Ze$  avec  $e$  la charge de l'électron. Ce noyau est entouré d'un *nuage* d'électrons qui gravite autour de lui.

**$Z$  est le nombre atomique = nombre d'électrons (ou de protons)**

Un ensemble de données expérimentales a permis de recenser et de classer 92 éléments stables distincts depuis l'hydrogène ( $Z = 1$ ) jusqu'à l'uranium ( $Z = 92$ ). Ces 92 éléments sont répertoriés dans le tableau de Mendeleïev.

Fallait-il supposer l'existence de 92 noyaux correspondant à des particules de charge  $e$ ,  $2e$ , ...,  $92e$ ? Cela paraissait bien compliqué. Il était plus tentant d'imaginer que les noyaux atomiques sont des assemblages différents de mêmes particules élémentaires. L'hypothèse selon laquelle les noyaux seraient faits de protons (particules de charge  $+$ ) et d'électrons se heurta à de nombreuses difficultés. Le problème fut résolu par la découverte du **neutron** en 1932 par Chadwick. Le neutron est une particule sans charge électrique de masse proche de celle du proton.

$$\begin{aligned} m_p &= 1,6724 \cdot 10^{-27} \text{ kg} & (m_p \cong 2000m_e) \\ m_n &= 1,6747 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

Le neutron et le proton sont donc les constituants élémentaires du noyau. Des forces attractives entre protons et électrons permettent à ceux-ci de graviter autour du noyau. Des forces nucléaires très grandes assurent la cohésion du noyau en liant les protons (et les neutrons) entre eux dans le volume très réduit du noyau. Ces forces prennent le pas sur les forces de répulsion électrique entre les protons portant des charges de même signe.

Certaines expériences ont montré que les atomes constituant un élément chimique (caractérisé par un  $Z$  donné) ne sont pas d'une espèce unique: on appelle **isotopes** des atomes qui ne diffèrent que par le nombre de **neutrons**. Si on appelle  $A$  le nombre de masse (nombre de protons + nombre de neutrons), la représentation chimique d'un isotope est



### Exemple

$U_{92}^{238}$	possède 92 protons et 146 neutrons
$U_{92}^{235}$	possède 92 protons et 143 neutrons

Tableau

Elément	Symbole	Nombre atomique	Nombre de masse	Masse atomique	Abondance relative %
Hydrogène	H <sup>1</sup>	Z = 1	A = 1	1,0076	99,985
	H <sup>2</sup> (1)	Z = 1	A = 2	2,014	0,015
	H <sup>3</sup> (2)	Z = 1	A = 3	3,016	0
Hélium	He <sup>3</sup>	Z = 2	A = 3	3,016	0,00013
	He <sup>4</sup> (3)	Z = 2	A = 4	4,0026	99,9999
Lithium	Li <sup>6</sup>	Z = 3	A = 6	6,015	7,52
	Li <sup>7</sup>	Z = 3	A = 7	7,016	92,47
Carbone	C <sup>12</sup> (4)	Z = 6	A = 12	12,000	98,89
	C <sup>13</sup>	Z = 6	A = 13	13,003	1,11
Plomb	Pb <sup>204</sup>	Z = 82	A = 204		1,48
	Pb <sup>206</sup>	Z = 82	A = 206		23,6
	Pb <sup>207</sup>	Z = 82	A = 207		22,6
	Pb <sup>208</sup>	Z = 82	A = 208		52,3

Nombre de masse = nombre de protons + nombre de neutrons

- (1) L'isotope lourd H<sup>2</sup> de l'hydrogène est également appelé *deutérium* (symbole D). Cet isotope très rare peut néanmoins être extrait par électrolyse fractionnée de l'eau ordinaire ou séparé de l'hydrogène H<sup>1</sup> par diffusion ou distillation. En combinaison avec l'oxygène O<sup>16</sup>, il forme l'*eau lourde* D<sub>2</sub>O.
- (2) L'isotope H<sup>3</sup> de l'hydrogène, également appelé *tritium* (T) n'existe pas dans la nature car il est instable. Le tritium est produit par certaines réactions nucléaires.
- (3) Le noyau He<sup>4</sup> est également désigné par le nom de particule  $\alpha$ .
- (4) **L'unité de masse atomique (u.m.a.) est égale à 1/12 de la masse d'un noyau de carbone C<sup>12</sup>; 1 u.m.a. = 1,66 x 10<sup>-27</sup> kg**

Un **élément chimique** est l'ensemble des atomes qui ont même valeur de  $Z$ .

Un **nucléide** est l'ensemble des atomes dont les noyaux ont même valeur de  $Z$  et de  $A$ . On connaît 325 nucléides stables et plus de 1200 nucléides radioactifs alors qu'il n'existe qu'une centaine d'éléments chimiques.

### Remarque

On croit aujourd'hui que les protons et les neutrons ne sont pas les constituants les plus élémentaires de la matière. Chacun d'entre eux serait constitués de 3 **quarks**. Ces particules porteraient des charges électriques fractionnaires, inférieures à celle de l'électron! *A suivre...*

## 2. Masse du noyau et force nucléaire.

On a pu constater que la masse d'un noyau  $X_Z^A$  est toujours inférieure à la somme des masses de ses nucléons constituants.

Ex. Le noyau d'hélium est constitué de 2 protons et de 2 neutrons:

$$m_p = 1,00727 \text{ u.m.a.} \quad \Rightarrow \quad 2m_p = 2,01454 \text{ u.m.a.}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ u.m.a.} \quad \Rightarrow \quad 2m_n = 2,01732 \text{ u.m.a.};$$

la masse totale de l'atome d'hélium devrait être égale à 4,03186 u.m.a.

Si on regarde dans le tableau de Mendeleïev, la masse mesurée de l'atome d'hélium est égale à 4,0026  $\Rightarrow$  4,03186 - 4,0026 = 0,0286.

Cette différence est appelée **défaut de masse** du noyau.

Ce défaut de masse trouve son origine dans l'énergie libérée lors de la formation du noyau.

C'est aussi l'énergie de liaison du noyau formé. Depuis longtemps, Einstein avait prévu la transformation de masse en énergie selon la formule

$$E = m \cdot c^2$$

↙

énergie  
en joule

↓

perte de masse  
en kg

↘

c = vitesse de la lumière  
= 300 000 km/s  
= 3 x 10<sup>8</sup> m/s

### 3. Les noyaux stables

Voir annexe

### 4. La radioactivité

#### *Historique*

En 1895, Röntgen avait découvert les rayons X. En 1896, le physicien français Henri Becquerel découvrit la radioactivité naturelle par l'impression de plaques photographiques en présence d'un échantillon d'uranium. **L'uranium émet donc spontanément un rayonnement pénétrant et invisible** capable d'impressionner des plaques photographiques.

Deux ans plus tard, Pierre et Marie Curie découvrirent deux éléments chimiques considérablement plus radioactifs que l'uranium, qu'ils baptisent **radium et polonium**.

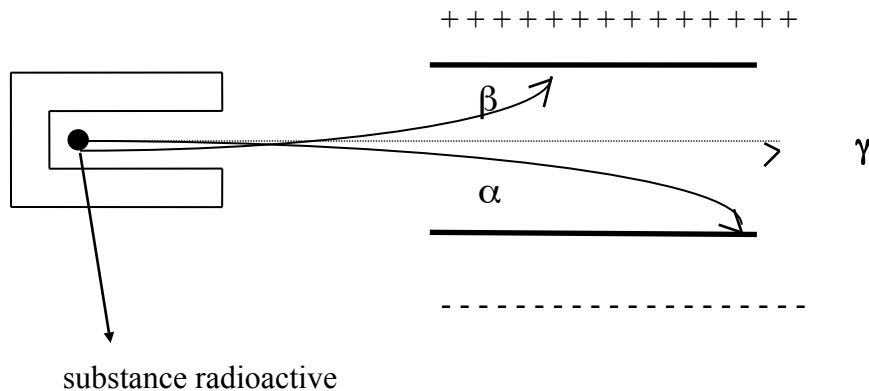
En 1934, Irène et Frédéric Joliot-Curie observèrent que l'aluminium devenait radioactif sous l'effet d'un bombardement de particules  $\alpha$  (noyaux  $\text{He}_2^4$ ). Ils avaient découvert la **radioactivité artificielle**.

La radioactivité est essentiellement un phénomène nucléaire: les rayonnements émis proviennent des noyaux. La radioactivité est due à la cassure spontanée d'un noyau instable.

#### **Différents types d'émissions radioactives**

Les émissions radioactives sont de trois types: l'action d'un champ électrique sur les particules émises par un corps radioactif montre qu'elles ne sont pas de même nature

enceinte de plomb



### 1. Particules $\alpha$ :

- massives, chargées positivement, peu déviées par le champ électrique
- émises avec une vitesse de l'ordre de 20000km/s
- très rapidement absorbées par la matière: elles sont arrêtées par une feuille de papier ou quelques centimètres d'air
- il s'agit de noyaux d'hélium  $\text{He}_2^4$ .

### 2. Particules $\beta$ :

- légères, chargées négativement, facilement déviées par le champ électrique
- émises avec une vitesse allant de 120000 à 290000km/s selon le noyau qui l'émet
- peuvent traverser de minces feuilles métalliques
- ce sont des électrons.

### 3. Rayons $\gamma$ :

- ne sont pas déviées par un champ électrique ou magnétique; ce sont des **photons** de grande énergie correspondant à un rayonnement électromagnétique de haute fréquence. Ils peuvent traverser une épaisseur de plomb de l'ordre de 20cm.

Tous ces rayonnements sont dangereux car ils sont ionisants. Les particules  $\alpha$  sont les plus ionisantes mais sont facilement absorbées par la matière. Les rayons  $\gamma$  sont les plus dangereux.

Les radioactivités  $\alpha$  et  $\beta$  correspondent bien à des désintégrations du noyau, qui par ce processus change de composition. La radioactivité  $\gamma$  est liée à la désexcitation du noyau. Les corps radioactifs artificiels émettent en général les mêmes rayonnements. Cependant, certains corps émettent des particules positives de même masse et de même charge (en valeur absolue) que les électrons. Ce sont des **électrons positifs** ou **positrons**: leur symbole est  $e^+$  ou  $\beta^+$ . Ils ont été découverts en 1932.

Certains nucléides se désintègrent en émettant un rayonnement. Ce sont ceux qui se trouvent en dehors de la zone de stabilité  $A = 2Z$ .

Lors des réactions nucléaires, il a toujours **conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique**

### Radioactivité $\alpha$

- elle est caractéristique des noyaux lourds ( $A > 200$ ,  $Z > 82$ ) qui contiennent trop de nucléons pour être stables;
- il y a un gros déséquilibre entre le nombre de protons et de neutrons



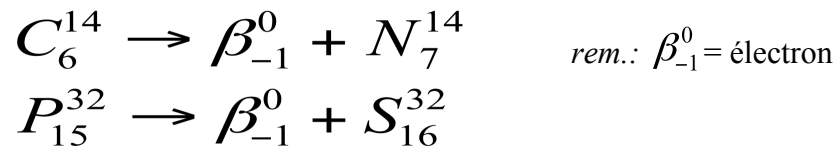
le nombre de nucléons est conservé:  $238 = 4 + 234$   
ou  
 $210 = 4 + 206$

### Radioactivité $\beta$

- elle est le propre des nucléons trop riches en neutrons: elle correspond à la désintégration d'un noyau avec émission d'un électron (l'électron est émis par le noyau);
- l'électron émis n'est pas issu du nuage électronique: la radioactivité  $\beta$  est due à la désintégration d'un neutron qui se transforme en proton avec émission d'un électron.

#### Exemple

Des substances légères comme le *carbone 14* ( $C_6^{14}$ ) et le *phosphore 32* ( $P_{15}^{32}$ ) sont instables donc radioactives. Pourtant, par rapport à leur isotope stable  $C_6^{12}$  et  $P_{15}^{31}$ , le déséquilibre protons-neutrons est faible



Dans les deux cas, la transformation se fait en montant d'une case dans le tableau périodique.

C'est par l'émission  $\beta^-$  de l'isotope  $U^{239}$  que le premier élément transurannique, le *neptunium 239*, a été produit et identifié. Il occupe la case 93 du tableau périodique. Il n'existe pas dans la nature; il est engendré par l'activité d'un réacteur nucléaire.

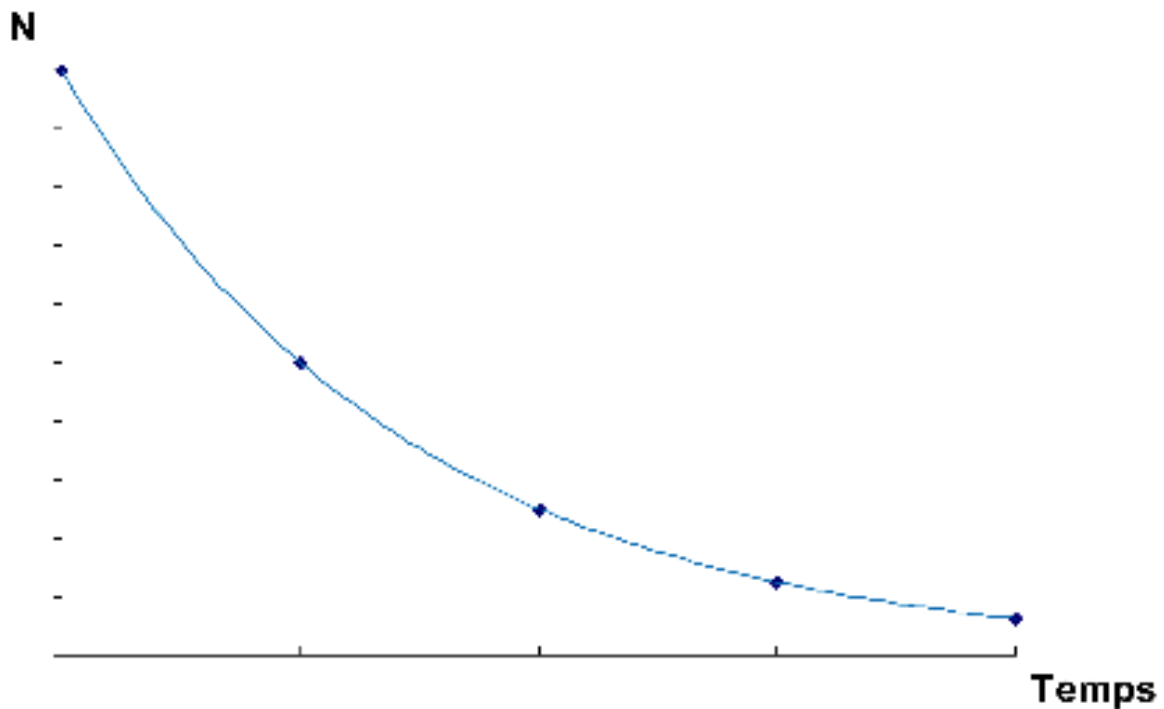
#### Remarque

Les émissions  $\alpha$  et  $\beta$  transmutent un élément en un autre élément, ce dernier conservant parfois un niveau élevé d'excitation. Cet élément excité peut évoluer vers un niveau d'énergie basse et stable en émettant un rayonnement  $\gamma$  de haute fréquence et au grand pouvoir de pénétration.

## 5. Demi-vie d'un radionuclide

Quel que soit le type de désintégration ( $\alpha$ ,  $\beta^-$  ou  $\beta^+$ ), un nuclide radioactif disparaît au fil du temps, sa masse diminuant d'autant plus vite que son *activité* (liée à la probabilité de désintégration) est plus importante. Chaque radionuclide est caractérisé par sa demi-vie.

On définit la *période radioactive* ou *demi-vie*  $T$ , la durée nécessaire pour qu'un radionuclide perde la moitié de ses noyaux radioactifs. On peut constater que le nombre de noyaux radioactifs diminue *exponentiellement* en fonction du temps. C'est la loi de décroissance radioactive.



Ordre de grandeur des périodes radioactives : de  $10^{-15}$  s à  $10^{19}$  ans.

<i>Radionuclide</i>	<i>Période</i>
$U_{92}^{238}$ ( $\alpha$ )	$4,5 \times 10^9$ ans
$I^{131}$ ( $\beta^-$ )	8 jours
$C^{60}$	5,2 ans
$C^{14}$	5 600 ans
$P_{84}^{212}$	$3 \times 10^{-7}$ s (0,3 $\mu$ s)

**Remarque**

Certains radionuclides disparaissent très rapidement, d'autres sont beaucoup plus encombrants car leurs demi-vies sont grandes (siècles, millénaires, etc.). Leur stockage éventuel comme déchets des activités nucléaires pose dès lors des problèmes. On sépare les radionuclides à période courte des radionuclides à période longue. Les premiers sont stockés dans des endroits isolés où ils se désactivent. Les seconds sont vitrifiés et déposés dans des lieux inaccessibles (au fond des océans ou dans des puits de mine désaffectés).

**Unité d'activité**

L'unité légale est le *becquerel* (Bq) : elle correspond à une désintégration par seconde.

L'unité pratique est le *curie* (Ci) : elle correspond à l'activité moyenne d'un gramme de radium ( $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ ).

L'activité naturelle du corps humain (70kg) est de 8000 Bq. L'activité de la quantité d'iode  $^{131}\text{I}$  injectée en une seule fois dans l'organisme pour un examen de la thyroïde est de 740000Bq. Une semaine après l'accident du réacteur de Tchernobyl en 1986, l'activité de l'air était de 60 Bq par  $\text{m}^3$ . Le seuil dangereux fixé par les normes internationales est de 400 Bq par  $\text{m}^3$ .

**6. Applications des radioisotopes****La datation**

La cosmochronologie est la détermination de l'âge des événements cosmiques. Les rapports d'abondance de divers radioéléments dans le système solaire donne son âge, soit  $4,6 \times 10^9$  ans. L'âge de la galaxie et de l'univers (si l'on admet qu'ils se sont formés en même temps) est estimé à  $1 \text{ à } 2 \times 10^{10}$  ans. Le *carbone 14* ( $\text{C}^{14}$ ) dont la période est de  $\sim 5600$  ans sert à déterminer l'âge des fossiles en paléontologie. On peut dater des objets vieux de 1000 à 60 000 ans par dosage du  $\text{C}^{14}$ .

**Utilisation des radioéléments artificiels**

La possibilité de créer de nombreux radionuclides artificiels dans les réacteurs par irradiation neutronique a permis le développement d'applications diverses. En effet, les appareils de mesure peuvent détecter les radiations émises avec une très grande sensibilité. Une seule goutte d'eau radioactive (eau dont l'hydrogène est l'isotope tritium  $\text{H}_1^3$ ) peut être détectée dans  $50\,000 \text{ m}^3$  d'eau !

**a. Usage des traceurs**

Si dans une réaction chimique, on remplace un élément chimique ordinaire par l'un de ses isotopes radioactifs (ex.  $\text{H}_1^3$ ,  $\text{I}^{131}$ ), on peut suivre par le comptage du rayonnement émis le comportement de cet élément. On mesure ainsi des vitesses de réaction, l'assimilation d'aliments dans l'organisme, le cheminement de fluides (eau, pétrole, etc.) dans les nappes souterraines, etc. Une injection contenant du sodium  $\text{Na}^{24}$  permet de suivre l'écoulement du sang. Les agronomes suivent la progression d'un engrais dans une plante à l'aide de radioéléments.



### b. Examens fonctionnels, la scintigraphie

La glande thyroïde, le foie, les reins retiennent certains radioéléments dans leurs tissus. L'injection dans l'organisme de ces radioéléments et l'analyse de leur répartition dans ces organes permettent de déterminer si leur fonctionnement est normal.

### c. La radiothérapie

Elle consiste à détruire les cellules cancéreuses par l'action du rayonnement  $\gamma$ . On utilise pour cela soit l'irradiation externe en plaçant le malade près d'une bombe au cobalt 60, soit l'irradiation interne en implantant un radioélément dans la zone malade (ex.  $I^{131}$ ).

### d. La gammagraphie

Le rayonnement  $\alpha$ , tout comme les rayons X, peut être utilisé pour radiographier des pièces métalliques et en révéler les défauts de structure. En particulier, la radiographie industrielle par rayonnement  $\gamma$  (*iridium 192*) permet de déceler d'éventuels défauts de structure dans les fuselages d'avion, les ponts, etc.

En conclusion, la physique nucléaire peut contribuer aussi bien au progrès qu'à la destruction de l'humanité. L'usage qui en est fait ne dépend que de la volonté des hommes.

## 7. Effets biologiques nocifs des rayonnements radioactifs

Tout être vivant est soumis en permanence aux radiations de l'environnement. Ainsi la croûte terrestre émet divers types de rayonnements qui proviennent en particulier de nombreux minerais (uranium, roches granitiques). D'autres rayonnements proviennent de l'espace : ce sont les *rayons cosmiques* que nous envoient le soleil et les étoiles. Certains composés naturels des organismes vivants sont aussi radioactifs (isotopes du carbone, potassium, etc.). A ces sources naturelles d'irradiation s'ajoute une irradiation d'origine technologique qui ne cesse de croître :

- radiologie médicale;
- les écrans de télévision et d'ordinateur;
- matériaux utilisés dans la construction des bâtiments;
- laboratoires de recherche qui utilisent beaucoup de radioéléments;
- centrales nucléaires;
- retombées radioactives des essais nucléaires militaires (actuellement prohibés).

Toutes ces activités sont susceptibles d'accroître l'irradiation ambiante à laquelle l'homme est exposé.

Les irradiations sont nocives pour les tissus humains car les particules émises ionisent les atomes des cellules (arrachement d'électrons aux couches périphériques des atomes). Un atome ionisé peut donner naissance à une transformation chimique de la molécule irradiée. Il peut aussi former dans les tissus des radicaux libres très toxiques qui prolongent l'action du rayonnement à d'autres molécules. Il peut donc y avoir destruction de cellules.

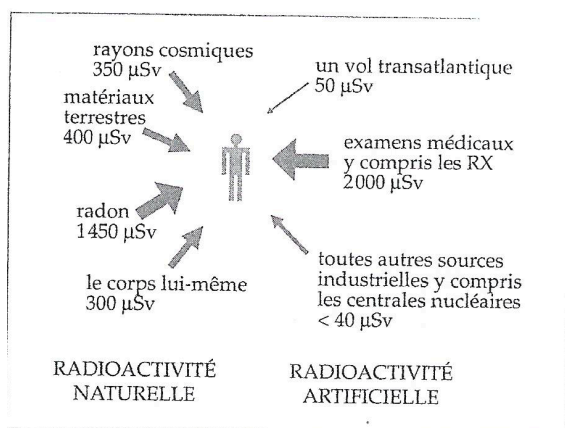
Les effets physiologiques dépendent évidemment de la dose absorbée de radiation, mais il faut aussi tenir compte de la partie du corps irradiée, de la durée d'irradiation et de la nature du rayonnement. Pour évaluer les effets physiologiques des radiations ionisantes, les doses reçues par unité de masse dans le corps humain se mesurent en **sievert (Sv)**.

Une dose de 1 Sv correspond à environ 1000 radiographies médicales du corps entier.

Une dose de 8 Sv reçue sur le corps entier en une seule irradiation est généralement mortelle.

Le **compteur Geiger** est un appareil qui mesure la quantité de radiation reçue par son capteur.

Les doses annuelles qui nous atteignent sont au total de l'ordre de quelques millisieverts.



Effets d'une irradiation brutale sur le corps entier	
Dose (Sv)	Effets
0 à 0,25	aucun effet apparent à court terme
1 à 2,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- troubles digestifs</li> <li>- épilations partielles</li> <li>- fatigue</li> <li>- troubles sanguins légers</li> </ul>
2,5 à 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nausées, vomissements</li> <li>- modification de la formule sanguine</li> <li>- risques mortels élevés</li> </ul>
au-delà de 6	- au moins 90 % de mortalité

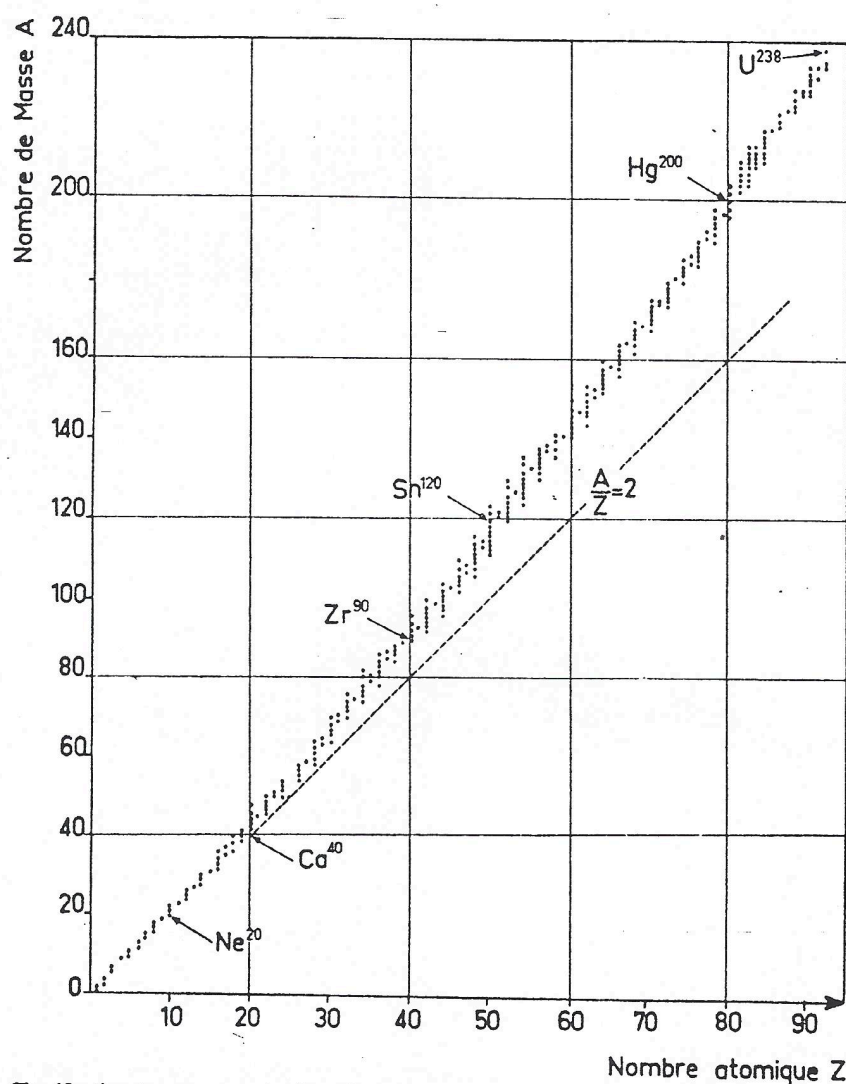
Étalée dans le temps, une même dose a des effets biologiques moins graves grâce à la régénération possible des tissus. Le principal danger des radiations vient de leur effet cumulatif. Par exemple, lors du traitement de tumeurs par des rayons  $\gamma$ , la dose totale absorbée par le tissu cancéreux en 30 séances durant 6 semaines peut être de 40 Sv. En comparant avec le tableau ci-dessus, on comprend l'importance d'une grande précision dans la détermination de la zone à irradier et de l'étalement dans le temps des séances pour détruire les cellules cancéreuses et protéger les tissus sains.

Les rayonnements, qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, peuvent atteindre l'organisme de deux manières soit par irradiation externe (exposition du corps à des sources qui lui sont extérieures) soit par irradiation interne (par voie respiratoire, cutanée ou digestive). Les rayons  $\alpha$  ou  $\beta$  sont surtout dangereux si les sources sont ingérées ou inhalées. En effet, les particules  $\alpha$  sont arrêtées par les couches superficielles de la peau, qui peut cependant se cancériser, et les particules  $\beta$  ne traversent que quelques cm de tissu. Par contre les rayons X et  $\gamma$  sont très pénétrants : ils sont donc dangereux sans être ingérés.

Le **radon** Rn 222 est un élément radioactif (émetteur  $\alpha$ ) gazeux, inodore et invisible. Il est une des étapes de la désintégration de l'uranium 238 présent à l'état de traces dans toutes les roches de l'écorce terrestre. Ces gaz pénètrent dans les habitations essentiellement par les caves. Son danger provient de l'inhalation. En Belgique, la radioactivité de l'air due à la présence de radon varie suivant les régions : 42 Bq/m<sup>3</sup> d'air au nord du sillon Sambre et Meuse, 85 Bq/m<sup>3</sup> au sud de ce sillon (sol plus schisteux). Pour être nocif, il faut que ce gaz soit emprisonné et accumulé, ce qui se produit dans les habitations bien isolées et construites avec des matériaux ayant une radioactivité naturelle (béton, briques, pierres). Il faut pratiquer une ventilation suffisante des habitations pour permettre à ce gaz de s'échapper. Des études médicales montrent que le radon est responsable de certains cancers du poumon.

## Annexe

En classant les noyaux en fonction de  $A$  et  $Z$ , on remarque que les combinaisons stables de neutrons et de protons sont loin d'être quelconques mais sont au contraire très proches de la droite  $A = 2Z$ . Il y a approximativement autant de neutrons que de protons dans les noyaux stables, au moins pour les éléments légers. Au-delà de  $Z = 20$ , les points représentatifs dans le diagramme s'éloignent systématiquement de la droite. Plus il y a de protons, plus la force de répulsion est grande entre ceux-ci. Il faut de plus en plus de neutrons pour compenser cette force de répulsion et maintenir la cohésion.



Classification des noyaux naturels en fonction du nombre atomique et du nombre de masse.

**Demi-vie (suite)**

Soit  $N_0$  le nombre initial de noyaux radioactifs.

Après 1 période, il en reste  $N_0/2$

2 périodes, il en reste  $N_0/4$

3 périodes, il en reste  $N_0/8$

4 périodes, il en reste  $N_0/16$

Après  $n$  périodes on aura  $N_t = \frac{N_0}{2^n}$

**Avec  $N_t$  le nombre de noyaux qui subsistent après un temps  $t$**

On a  $t = n T$  avec  $n$  le nombre de périodes et  $T$  la période ou demi-vie

L'activité d'une substance mesure le nombre de particules  $\alpha$  ou  $\beta$  qu'elle va émettre par seconde. Elle se mesure en becquerel. **1 Bq = 1 désintégration/sec** = une particule ( $\alpha$  ou  $\beta$ ) émise par seconde.

L'activité d'une substance est directement liée au nombre de noyaux présents. Si  $A_0$  est l'activité initiale et  $A_t$  l'activité à l'instant  $t$ , on peut donc dire que :

$$A_t = \frac{A_0}{2^n}$$

**Exercices**

1. On trouve dans une grotte un échantillon de charbon de bois contenant du  $C^{14}$  dont la période vaut 5600 ans. L'activité du  $C^{14}$  dans l'échantillon n'est plus que de 1,6 désintégrations/min alors qu'elle serait de 11,5 désintégrations/min pour un même échantillon de charbon de bois actuel : convertir les activités en Bq et calculer l'âge de l'échantillon.

2. Une substance radioactive dont la demi-vie vaut 15sec a une activité initiale égale à  $2,16 \cdot 10^{12}$  désintégrations/heure. Quelle sera son activité en Bq au bout de 3 min ?  
(Rép :  $1,465 \cdot 10^5$  Bq)