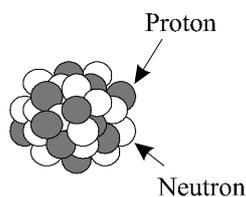
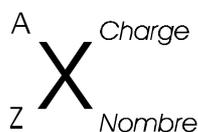


# Les noyaux atomiques

## Description des noyaux atomiques



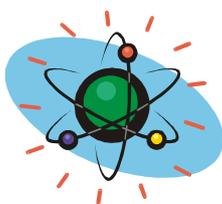
Noyau atomique



A : Nombre de masse

Z : Numéro atomique

X : symbole de l'élément



$$1 \text{ u}$$

=

$$1,66056 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m({}^{32}_{16}\text{S}) = 32 \text{ u}$$

### 3.1.1 Représentation symbolique des noyaux.

#### Nucléons

Le nombre de neutrons contenus dans le noyau est représenté par N.

Le nombre total de **nucléons** (protons + neutrons) est appelé **nombre de masse**. Il est noté A. Le nombre de masse vaut  $A = Z + N$ .

#### Élément chimique

Il existe 90 **éléments naturels**. Les éléments de numéros atomiques  $Z = 43$ ,  $Z = 61$ , ainsi que tous les éléments pour lesquels  $Z > 92$  sont **artificiels**.

#### Nucléide

Un **nucléide X** est constitué par l'ensemble des noyaux possédant le même nombre de charges et le même nombre de masse.

Il est représenté par :  ${}^A_Z\text{X}$

On connaît actuellement 331 espèces de noyaux différents dans la nature. Ces noyaux constituent l'ensemble des **nucléides naturels**.

#### Cf. exercice 1

#### Isotopes

Les **isotopes** sont les nucléides d'un même élément qui n'ont pas le même nombre de masse. Ils possèdent le même nombre de protons, par contre leur nombre de neutrons est différent.

### 3.1.2 Rayon des noyaux

Le noyau est assimilable à une sphère de rayon r de l'ordre de quelques fermis (1 fm =  $10^{-15}$  m). Le volume d'un noyau vaut donc  $(4/3) \cdot \pi \cdot r^3$ . Le volume d'un noyau est aussi proportionnel au nombre A de nucléons qu'il renferme. Par conséquent, le rayon r est proportionnel à  $A^{(1/3)}$ , et suit la loi :

$$r = r_0 \cdot A^{(1/3)}$$

L'expérience montre que la constante  $r_0 = 1,2$  fm est valable pour l'ensemble de la classification périodique (à l'exception du noyau  ${}^1_1\text{H}$ ).

#### Cf. exercice 2

### 3.1.3 Masse des atomes

#### Masse atomique

La masse d'un atome peut être mesurée expérimentalement avec une grande précision. On l'exprime en **unité de masse atomique** (en abrégé u.m.a, symbole u).

masse du proton :  $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ; 1,007 u

masse du neutron :  $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ; 1,009 u

masse de l'électron :  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  ;  $5,5 \cdot 10^{-4} \text{ u}$

La **masse d'un atome** exprimée en u.m.a. est donc très voisine de son nombre de masse.

### Masse atomique moyenne d'un élément

La **masse atomique moyenne** d'un élément est la **moyenne** des masses atomiques de ses **isotopes** naturels pondérées par leurs proportions respectives.

Isotope	Abondance en %	Masse en u
$^{35}_{17}\text{Cl}$	75.53	34.97
$^{37}_{17}\text{Cl}$	24.47	36.97

$$m(\text{Cl}) = (75,53/100) \cdot 34,97 + (24,47/100) \cdot 36,97 = 35,46 \text{ u}$$

Remarque : ce type de calcul est valable pour tous les éléments. Le résultat figure dans la classification périodique.

Cf. exercices 3 et 4

## La radioactivité naturelle



En 1896, Henri Becquerel découvre la radioactivité naturelle en observant l'émission de "rayonnement" par les sels d'uranium.

En 1898, Pierre et Marie Curie isolent deux nouveaux éléments radioactifs qu'ils baptisent polonium et radium.

En 1903, Ernest Rutherford et Frederick Soddy expliquent la nature de la radioactivité.

### 3.1.4 Émissions radioactives

#### Composition du rayonnement

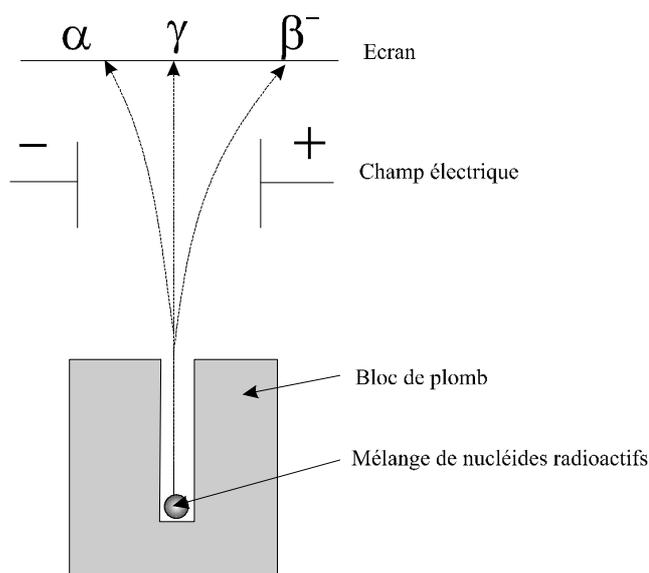
La **radioactivité** est un phénomène manifesté par 47 des 31 nucléides naturels. On parle alors de "radioactivité naturelle".

Selon les nucléides considérés, des rayons désignés par  $\alpha$ ,  $\beta^-$  ou  $\gamma$  peuvent être émis. L'influence d'un champ électrique sur leurs trajectoires montre que les rayons  $\alpha$  sont constitués de particules chargées positivement, les rayons  $\beta^-$  sont formés de particules négatives, alors que les rayons  $\gamma$  sont neutres.

$\alpha$   
positif

$\gamma$   
neutre

$\beta^-$   
négatif



Séparation du rayonnement par un champ électrique

Le rayonnement que produisent les atomes radioactifs est accompagné d'une modification de la composition de leurs noyaux. Ce phénomène appelé **transmutation** intervient spontanément.

### Production du rayonnement par les noyaux

#### Rayons $\alpha$

$\alpha$   
noyau d'hélium

Peu pénétrant

Il s'agit d'un flux de **noyaux d'hélium**  ${}^4_2\alpha$  éjectés par les noyaux qui se désintègrent. Malgré leur vitesse initiale de l'ordre de  $2 \cdot 10^4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , ces particules peu pénétrantes sont facilement arrêtées par une feuille de papier.



L'émission d'une particule  ${}^4_2\alpha$  par un nucléide de numéro atomique  $Z$  le transforme en nucléide de numéro atomique  $Z-2$ . Le symbole  $\text{X}'$  du nouveau nucléide formé recule de deux cases dans la classification des éléments.

#### Rayons $\beta^-$

$\beta^-$

neutron



proton + électron

Ce sont des **électrons**  ${}^0_{-1}e$  qui proviennent de la transformation d'un neutron en proton à l'intérieur du noyau. Ils sont éjectés du noyau à près de  $2,8 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .



L'émission d'un électron par un nucléide de numéro atomique  $Z$  le transforme en nucléide de numéro atomique  $Z+1$ . Le symbole  $\text{X}'$  du nouveau nucléide formé avance d'une case dans la classification des éléments.

**Remarque :** le nombre total de nucléons et la charge électrique globale sont conservés au cours des réactions  $\alpha$  et  $\beta^-$ . En effet, la somme des nombres de masse du nucléide  $\text{X}'$  et de la particule émise est égale au nombre de masse du nucléide  $\text{X}$ .

D'une manière identique, la somme des nombres de charges du nucléide  $\text{X}'$  et de la particule émise est égale au nombre de charges du nucléide  $\text{X}$ .

#### Rayons $\gamma$

$\gamma$   
onde  
électromagnétique

très énergétique et  
pénétrant

Ce sont des **radiations** de très haute énergie qui accompagnent normalement la production de rayons  $\alpha$  ou  $\beta^-$  (mais pas exclusivement). Le rayonnement  $\gamma$  est extrêmement pénétrant. Il est capable de traverser une paroi de plomb de 20 cm d'épaisseur.

#### Conséquence sur les électrons

Une désintégration  $\alpha$  ou  $\beta^-$  modifie le nombre de protons des atomes  $\text{X}$ . La composition de leurs nuages électroniques se trouve contrainte d'évoluer pour rétablir la neutralité électrique des nouveaux atomes formés  $\text{X}'$ .

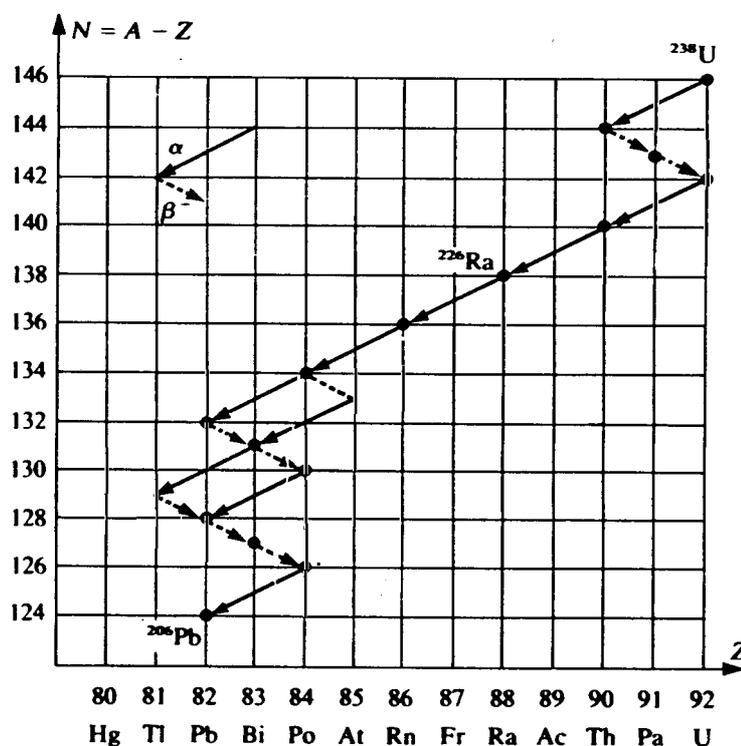
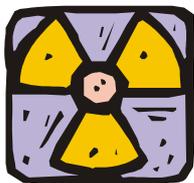
Les électrons sont simplement cédés ou pris par la source radioactive à la matière constituant son environnement direct : récipient contenant la source, atmosphère, éléments du montage, sol.

**Remarque:** La matière irradiée subit également une ionisation (voir le cours de discipline fondamentale), d'où la terminologie de "rayonnements ionisants" appliquée, entre autre, aux émissions radioactives.

Cf. exercice 5

## Familles radioactives

Si le nucléide résultant d'une désintégration est radioactif, il se désintègre à son tour. La chaîne de réactions ne sera interrompue que s'il se forme un nucléide stable. Les atomes produits successivement forment une *famille radioactive*.

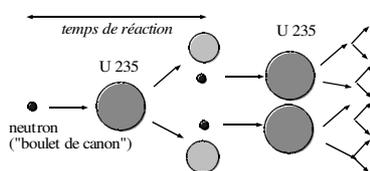


On connaît trois familles importantes de nucléides radioactifs naturels : famille de l'uranium 235, famille de l'uranium 238, et famille du thorium 232. Chacune de ces trois familles aboutit à l'un des isotopes stables du plomb.

*Remarque :* certains nucléides radioactifs naturels n'appartiennent à aucune famille, comme :  $^{14}_6\text{C}$ ,  $^{40}_{19}\text{K}$ ,  $^{87}_{37}\text{Rb}$ , etc.

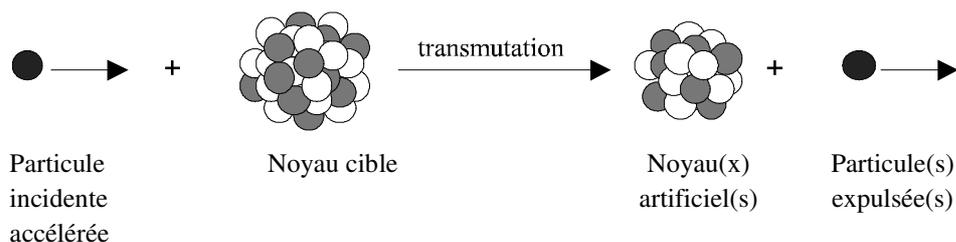
Cf. exercice 6

## Réactions nucléaires provoquées

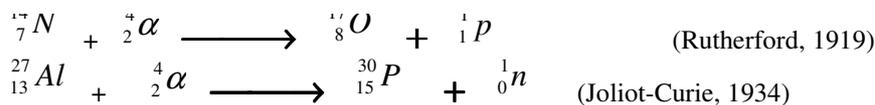


### Production de nucléides artificiels

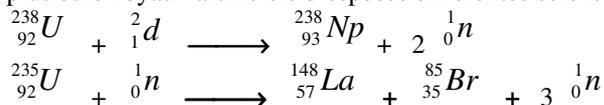
Lorsqu'une particule lancée à grande vitesse entre en collision avec un noyau cible, la transmutation qui en résulte peut donner naissance à un noyau inconnu dans la nature. Actuellement, plus d'un millier de nucléides artificiels ont été produits selon cette méthode.



Particules incidentes utilisables : protons  $^1_1\text{p}$ , neutrons  $^1_0\text{n}$ , noyaux de deutérium  $^2_1\text{d}$ , noyaux d'hélium  $^4_2\alpha$ , autres noyaux...



Il arrive que plusieurs particules puissent être expulsées lors de la même réaction, ou que plusieurs noyaux artificiels d'espèces différentes soient formés.



**Remarque :** au cours de la production de nucléides artificiels, les nucléons apportés par le noyau cible et la particule incidente sont redistribués entre le noyau artificiel et la particule expulsée.

Cf. exercice 7

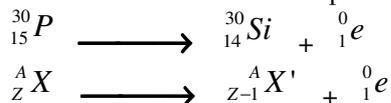
### Désintégration des nucléides artificiels

Les nucléides artificiels sont tous **radioactifs**. Comme les nucléides naturels, ils peuvent se transmuter en émettant des rayons  $\alpha$ ,  $\beta^-$  et  $\gamma$ .

Deux autres modes de désintégrations leurs sont spécifiques : l'émission de rayons  $\beta^+$ , et la capture électronique (souvent représentée par les initiales C.E).

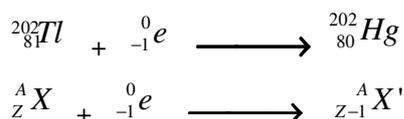
#### Rayons $\beta^+$

Il s'agit d'un flux de **positrons**  ${}^0_1e$  (électrons positifs) éjectés par le nucléide artificiel suite à la transformation d'un proton du noyau en neutron.



#### Capture électronique

Le noyau capture un **électron du nuage**.



**Remarques :** les nucléides qui résultent d'une réaction  $\beta^+$  ou d'une capture électronique ont une composition identique. Leur nombre de charges  $Z$  ayant diminué d'une unité, leur symbole  $X'$  recule d'une case dans la classification des éléments.

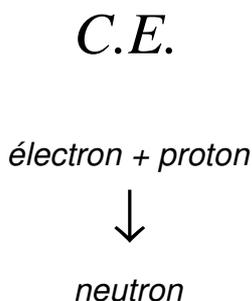
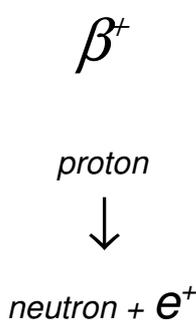
Comme pour les désintégrations  $\alpha$  et  $\beta^-$ , ces deux processus laissent inchangés le nombre total de nucléons et la charge électrique globale.

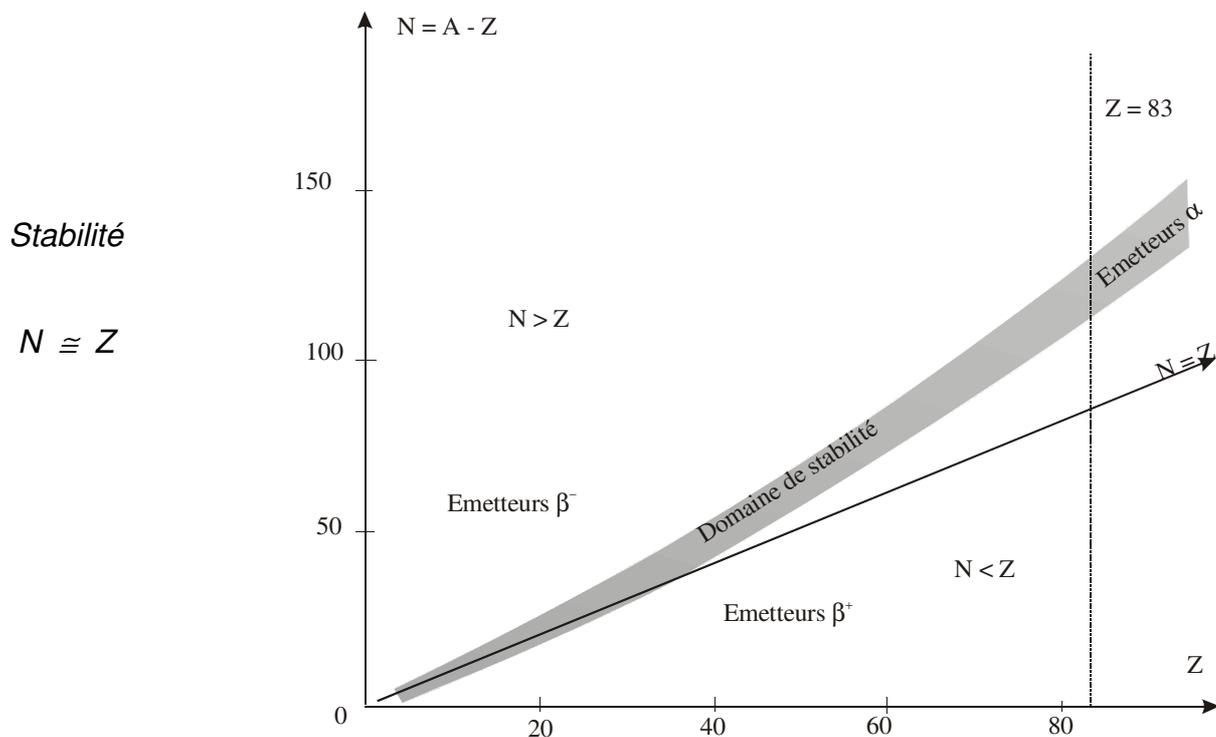
Cf. exercices 8 et 9

## Origine de la radioactivité

### Domaine de stabilité

L'expérience montre que la **stabilité** des nucléides dépend directement de leur **composition**.



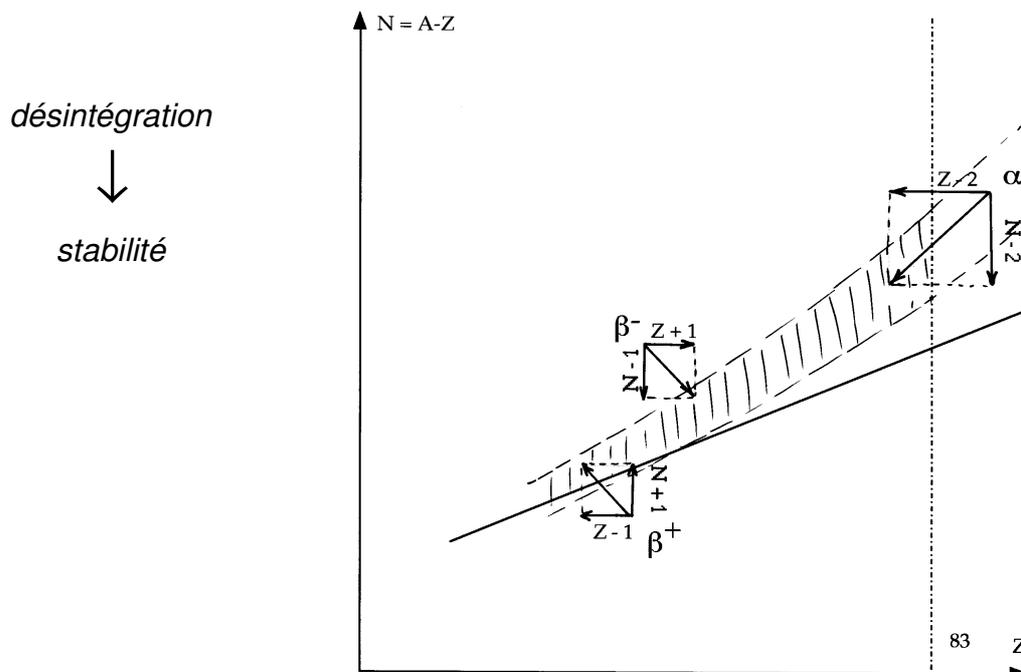


Les nucléides stables comportent au moins autant de neutrons que de protons (sans que la valeur de  $N$  ne dépasse celle de  $Z$  de plus de 50%).

Tous les nucléides dont le nombre de protons dépasse  $Z = 83$  sont radioactifs.

### Évolution de la composition d'un nucléide instable

Le **mode de désintégration** adopté par un nucléide instable est étroitement lié à sa **composition** initiale.



désintégration  
↓  
stabilité

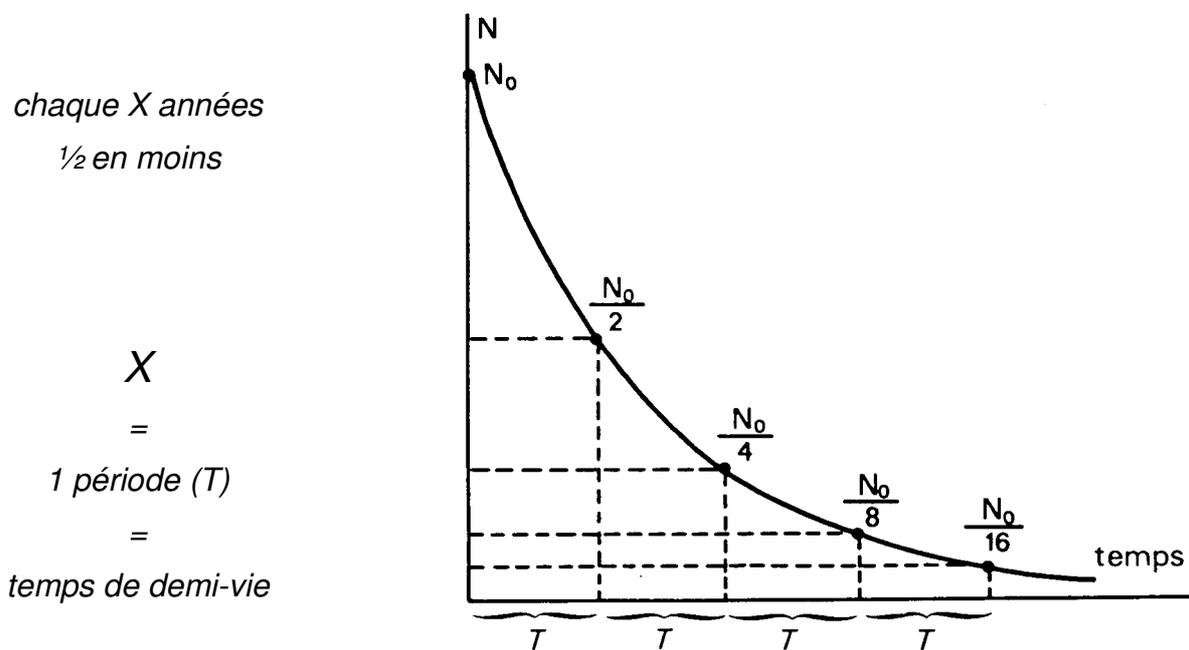
Par conséquent, la **transmutation** d'un nucléide instable permet au nouveau nucléide formé d'évoluer vers le **domaine de stabilité**.

Cf. *exercice 10*

## Décroissance de la radioactivité

### Évolution au cours du temps

A mesure qu'il se transforme, un nucléide radioactif disparaît de manière extrêmement régulière au cours du temps.



La **période** est le temps  $T$  au bout duquel la moitié des noyaux considérés à un instant auront disparu. Ce paramètre, encore appelé temps de demi-vie, permet de caractériser l'allure à laquelle la décroissance radioactive se produit.

La valeur de la période dépend entièrement de la **nature** du nucléide.

Nucléide	Emission	Période(*)	Nucléide	Emission	Période(*)
$^{115}\text{In}$	$\beta$	$5 \cdot 10^{14}$ a	$^3\text{H}$	$\beta$	12,3 a
$^{238}\text{U}$	$\alpha, \gamma$	$4,5 \cdot 10^9$ a	$^{60}\text{Co}$	$\beta, \gamma$	5,3 a
$^{40}\text{K}$	$\beta$	$1,3 \cdot 10^9$ a	$^{210}\text{Po}$	$\alpha, \gamma$	138 j
$^{235}\text{U}$	$\alpha$	$7,1 \cdot 10^8$ a	$^{131}\text{I}$	$\beta, \gamma$	8 j
$^{239}\text{Pu}$	$\alpha, \gamma$	$2,4 \cdot 10^4$ a	$^{49}\text{Ca}$	$\beta, \gamma$	2,5 h
$^{14}\text{C}$	$\beta$	$5,7 \cdot 10^3$ a	$^{218}\text{Po}$	$\beta$	3 min
$^{226}\text{Ra}$	$\alpha, \gamma$	$1,6 \cdot 10^3$ a	$^{92}\text{Kr}$	$\beta$	2,4 s
$^{90}\text{Sr}$	$\beta$	29 a	$^{214}\text{Po}$	$\alpha$	$1,6 \cdot 10^{-4}$ s

\* a = année; j = jour; h = heure; min = minute; s = seconde

(Voir également la partie : "tableau d'isotopes sélectionnés", dans la classification des éléments).

### Activité

activité

=

nombre de  
désintégrations par  
seconde

L'**activité** d'une substance radioactive représente le nombre de désintégrations ayant lieu chaque seconde. On la détermine à l'aide d'un compteur Geiger.

L'unité d'activité est le becquerel (symbole Bq) ou le curie (symbole Ci).

1 Bq = 1 désintégration par seconde

1 Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq (activité de 1g de radium)

L'activité d'un échantillon décroît au cours du temps, comme le nombre de noyaux

radioactifs encore présents. Elle se trouve réduite de moitié après chaque période T.

Cf. exercices 11 et 12

## Utilisation de la radioactivité

Le rayonnement émis par les nucléides radioactifs naturels ou artificiels trouve de multiples usages :

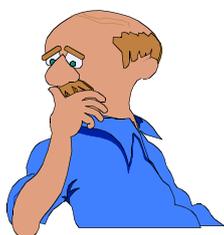
- datation (roches,  $^{14}_6\text{C}$ ). Cf. exercices 13 et 14
- analyse par activation
- utilisation de traceurs, imagerie médicale
- production d'énergie
- traitement des tumeurs par irradiation
- stérilisation
- etc...

## Exercices

1. Complétez le tableau suivant :

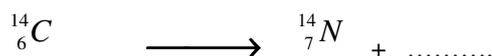
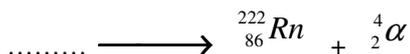
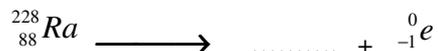
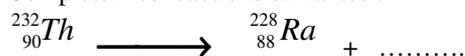
Nucléide	$\dots\dots\dots\text{Cr}$	$^{235}_{92}\text{U}$		
Elément	Cr	U	C	
Nombre de nucléons	52		12	
Nombre de protons	24		6	6
Nombre de neutrons				8

2. Calculez le rayon d'un noyau de  $^{12}_6\text{C}$ . Déterminez la valeur de N pour le noyau de molybdène dont le rayon vaut le double de celui de  $^{12}_6\text{C}$ .
3. Le magnésium est un élément constitué de 78.70 % de  $^{24}_{12}\text{Mg}$ , de 10.13 % de  $^{25}_{12}\text{Mg}$ , et de 11.17 % de  $^{26}_{12}\text{Mg}$ . Déterminez la masse moyenne de l'élément magnésium, sachant que les masses de ses trois isotopes naturels valent respectivement : 23.99 u, 24.99 u, et 25.98 u.
4. Calculez le rayon r du noyau  $^{238}_{92}\text{U}$ . En déduire sa masse volumique  $\rho$  exprimée en  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

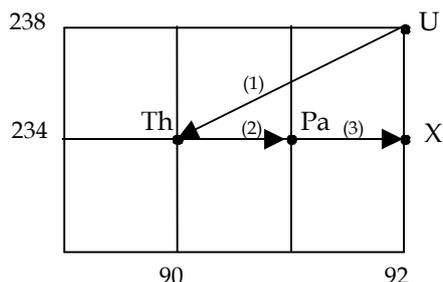


**Données :**  $\rho = m/V$  ;  $V = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3$ ;  $1 \text{ u} = 1.66055 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

5. Complétez les réactions suivantes :



6. Ecrire les équations correspondant aux désintégrations (1), (2) et (3). Précisez le type de radioactivité associé à chacune d'elles. Indiquez le nom et le symbole du nucléide X.

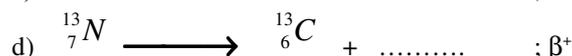
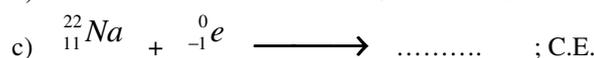
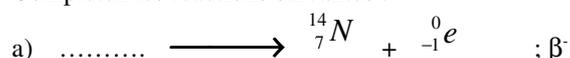


U : uranium  
Th : thorium  
Pa : protactinium

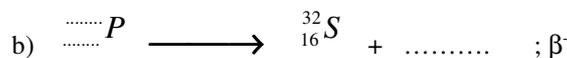
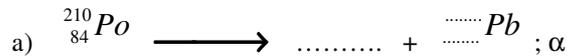
7. Complétez les réactions suivantes :



8. Complétez les réactions suivantes :

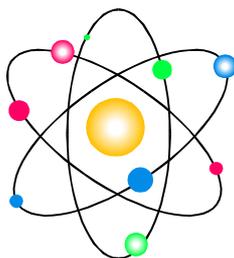


9. Complétez les réactions suivantes :



10. Les isotopes du fluor ( $Z = 9$ ) ont pour nombres de masse 17, 18, 19, 20, 21 et 22.

Sachant que seul l'isotope  ${}^9_{19}\text{F}$  est stable, prévoyez le type de radioactivité ( $\alpha$ ,  $\beta^+$  ou  $\beta^-$ ) que présentent les autres.



11. Dans un échantillon, la masse de  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  contenue diminue de 75 % en 6 minutes. Calculez la période T de ce nucléide.

12. La période de  ${}_{55}^{137}\text{Cs}$  vaut  $T = 30$  ans. Sachant qu'un échantillon de ce nucléide a une activité initiale  $a_0 = 3,7 \cdot 10^5$  Bq, déterminez dans 150 ans :

a) l'activité a qu'aura  ${}_{55}^{137}\text{Cs}$  dans cet échantillon.

b) le pourcentage de noyaux de  ${}_{55}^{137}\text{Cs}$  ayant été désintégrés à cette date.

13. On désire connaître la date de la dernière éruption de trois volcans d'Auvergne

(France) par la mesure de l'activité du  ${}^6_{14}\text{C}$  dans les cendres de végétaux

carbonisés lors de ces éruptions. La période du  ${}^6_{14}\text{C}$  vaut  $T = 5730$  ans

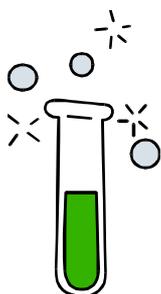
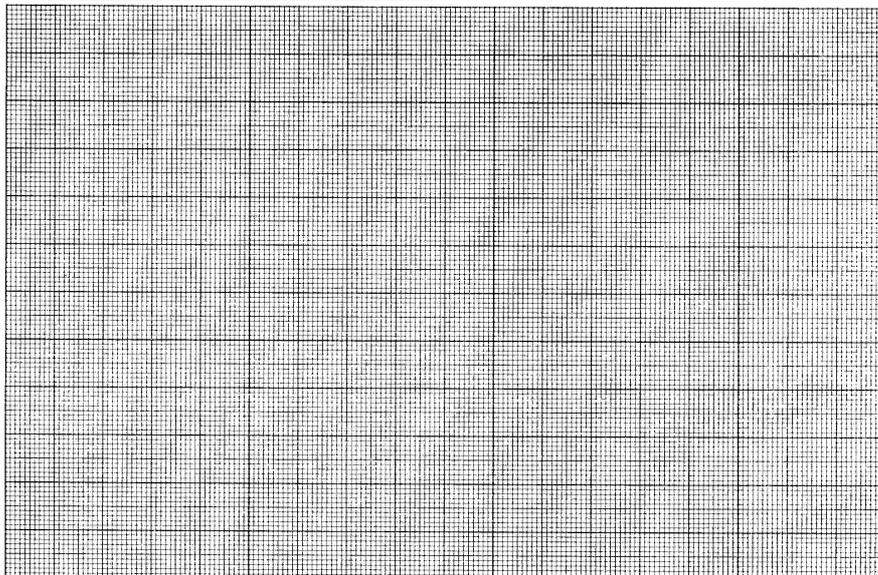
$a_{(t)} / a_0$		0.70		0.38	0.25	0.18
Temps en années	0	3000	5730	8000		14000

Sachant que  $a_0$  correspond à l'activité du  ${}^6_{14}\text{C}$  dans un échantillon de bois vivant servant de référence, et que  $a_{(t)}$  représente l'activité du  ${}^6_{14}\text{C}$  contenu dans les

échantillons :

- a) Complétez le tableau ci-dessus, puis tracez la courbe représentative de l'évolution de  $a_{(t)}/a_0$  en fonction de  $t$ , pour  $t$  variant de 0 à 14 000 ans.
- b) En utilisant la courbe, déterminez l'époque à laquelle ces éruptions ont eu lieu.

Lieu de l'éruption	$a_{(t)} / a_0$
Puy de Montcineyre	0.49
Puy de Montchal	0.44
Puy de Lassolas	0.39



14. Pour déterminer l'âge d'échantillons minéraux rapportés par les astronautes d'Apollo XI, on a mesuré les quantités relatives de  ${}^{40}_{19}K$  radioactif et de son produit de décomposition  ${}^{40}_{18}Ar$ , qui est en général retenu par la roche.
- a) Ecrire l'équation de désintégration.
- b) La période du nucléide  ${}^{40}_{19}K$  est  $T = 1,5 \cdot 10^9$  ans. Calculez l'âge de l'un de ces échantillons sachant qu'1 g de roche contient  $1,57 \cdot 10^{-6}$  g de  ${}^{40}_{19}K$  et  $10,99 \cdot 10^{-6}$  g de  ${}^{40}_{18}Ar$ .