

Année 2009  
Licence de Sciences et Technologies - Mention Sciences et Vie de la Terre  
1<sup>er</sup> Semestre

# Cours de Radioactivité

## II. La radioactivité

*Arnaud Serres*  
*Ateliers*  
*arnaud.serres@univ-nc.nc*






## II. La radioactivité

### 1. introduction

- 1896 : découverte du phénomène par **Henri Bequerel**.
  - quelques noms célèbres : **Pierre et Marie Curie**, notamment au travers de leur travail sur le Radium.
  - la **radioactivité naturelle** observable sur Terre provient de la désintégration de **quatre noyaux radioactifs**:  
 $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$
- et de leurs noyaux fils. Ces noyaux proviennent des étoiles et de certaines de leurs phases explosives (supernovae) et du bombardement du globe terrestre par des particules subatomiques d'origine cosmique.
- la **radioactivité naturelle** de la Terre a généré **suffisamment d'énergie pour maintenir son noyau en fusion** : l'énergie produite dite **géothermique est une énergie d'origine radioactive et nucléaire**.
  - les éruptions volcaniques et ont permis la formation de l'atmosphère terrestre primitive et de l'apparition de la vie. D'autre part, la radioactivité a certainement joué un rôle dans la **mutation cellulaire** et par conséquent la **diversification des formes de vie terrestre**.
  - la radioactivité n'est qu'une des multiples formes apparentes de l'immense énergie nucléaire contenue dans les noyaux atomiques.
  - des **applications civiles** mais aussi **militaires** : centrales électronucléaires, production de traceurs radioactifs pour le diagnostic médical, traitement des cancers par radiothérapie, **datation archéologique**, imagerie moléculaire par marquage à l'aide de traceurs radioactifs, bombes à fission ou fusion...

## II. La radioactivité

### 2. stabilité des atomes

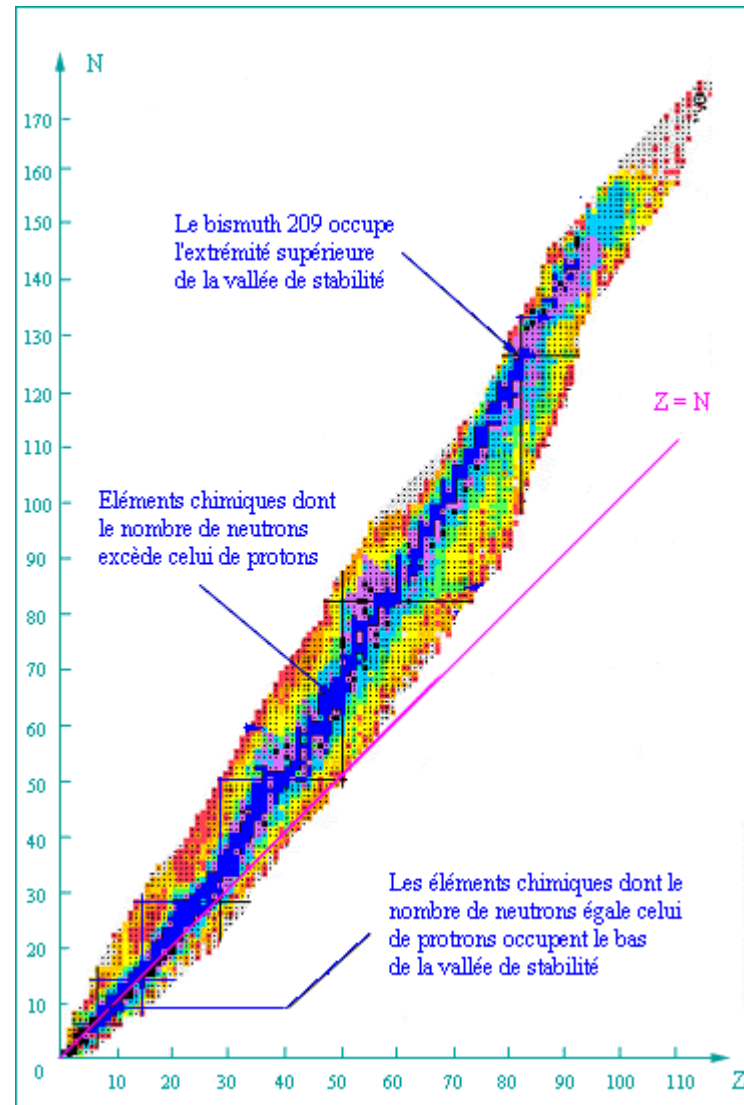
- pour certains nucléïdes  **transformation spontanée** au cours du temps.  
 **changement de nature** du noyau qui s'accompagne d'**émission de particules**.  
(par **fission** ou **capture électronique**).
- quels nucléïdes ?  noyaux **lourds** (A et Z importants)  
 noyaux avec un **déficit** ou un **excès de neutrons**  
 **noyaux radioactifs qui se désintègrent**.

Rque : la désintégration est indépendante des conditions physico-chimiques et de l'âge du nucléïde.

- on connaît près de de 2000 noyaux d'atomes, mais **seulement 279 sont stables**.
- règles d'identification d'un noyau stable (en général) :
  - \* **noyaux légers** : noyaux dont le nombre de protons est égal au nombre de neutrons.
  - \* **noyaux lourds** : il faut plus de neutrons que de protons afin de neutraliser les forces de répulsion croissantes entre les protons
  - \* 80% des noyaux stables possèdent un nombre pair de protons et 78% un nombre de pair de neutrons.

## II. La radioactivité

### 2. stabilité des atomes



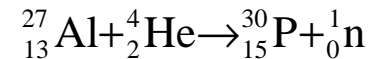
## II. La radioactivité

### 2. stabilité des atomes

- **tous les éléments qui contiennent plus de 83 protons sont radioactifs.**

- il est possible de synthétiser au laboratoire des radio-isotopes artificiels qui n'existent pas à l'état naturel :

exemple : synthèse réalisée par **Pierre et Irène Joliot-Curie** en 1934



- **petit rappel** : l'énergie de cohésion du noyau est le **défaut de masse** dans le noyau lorsqu'on compare la masse individuelle des protons et des neutrons au noyau.

- exemple : énergie de cohésion du noyau  ${}_{92}^{235}\text{U}$  de masse  $m = 235,0439 \text{ u}$

\* nombre de protons ? **92**  masse totale des protons (en u) :  $m_p = 92 \times 1,00728 = 92,66976 \text{ u}$

\* nombre de neutrons ? **143**  masse totale des neutrons (en u) :  $m_n = 143 \times 1,00867 = 144,23981 \text{ u}$

\* masse des nucléons (protons + neutrons) :  $m_{\text{th}} = m_p + m_n = 236,9096 \text{ u}$

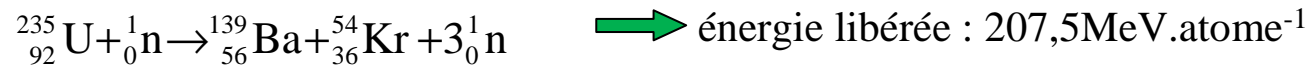
 **énergie de cohésion du noyau** :  $E = m_{\text{th}} \cdot c^2 - m \cdot c^2 = 2,79 \cdot 10^{-10} \text{ J.atome}^{-1}$

## II. La radioactivité

### 3. réactions nucléaires

#### a) fission nucléaire

- **définition** : réaction au cours de laquelle un **noyau se scinde en 2 fragments plus petits**.
- exemple : l'uranium  $^{235}\text{U}$  subit la fission quand il absorbe un neutron thermique (de vitesse lente)



- **définition** : **masse critique**

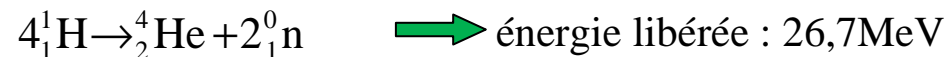
$\longrightarrow$  c'est la plus petite masse pour laquelle on produit un nombre de neutrons supérieur au nombre de neutrons absorbés : on a alors une réaction en chaîne (contrôlée dans une centrale électronucléaire).

#### b) fusion nucléaire

- **définition** : réaction au cours de laquelle **2 noyaux se complètent pour en former un nouveau**.

$\longrightarrow$  la réaction de fusion produit plus d'énergie que la fission.

- exemple : production d'hélium au cœur du soleil :



- la maîtrise des réactions de fusion nucléaire est un véritable **enjeu technologique** :

- \* ITER : production de chaleur (objectif : produire 500MW avec 50MW initiaux)
- \* par énergie laser : températures  $\approx 10^6\text{C}$ , pressions  $\approx 10^3\text{atm}$ ...

## II. La radioactivité

### 4. la radioactivité

#### a) loi de désintégration radioactive (ou décroissance radioactive)

- noyaux radioactifs  $\rightarrow$  instables donc se désintègrent au cours du temps.
- pour un noyau  $\rightarrow$  probabilité de désintégration pendant  $dt$  est une **caractéristique du noyau**.
- Soit  $N_{(t)}$  : nombre d'atomes radioactifs d'une espèce présents à un instant  $t$ .
  - \* entre  $t$  et  $t+dt$   $\rightarrow$   $dN$  noyaux (**variation du nombre de noyaux**) se sont désintégrés.

$\rightarrow$  la variation est proportionnelle au nombre  $N_{(t)}$  d'atomes à l'instant  $t$  selon :  $dN = -\lambda N_{(t)} dt$

- en écrivant cette loi de variation sous la forme :  $\frac{dN}{dt} = -\lambda N_{(t)}$  , et en intégrant entre  $t = 0$  et  $t$  :

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

$N_0$   $\rightarrow$  nombre de noyaux à  $t = 0$ .

$\lambda$   $\rightarrow$  **constante radioactive** du nucléide

## II. La radioactivité

### 4. la radioactivité

#### *b) période radioactive $T$ ou période de demi-vie ( $1/2$ -vie)*

- **définition** : la **période radioactive** ou la **période de demi-vie**

➔ **temps nécessaire** pour que la **moitié des  $N_0$  atomes** présents à  $t = 0$  se soient désintégrés.

- à l'instant  $t = T$ , le nombre de nucléides a été divisé par 2. On a donc :

$$N_{(T)} = N_0 e^{-\lambda T} = \frac{N_0}{2} \Rightarrow e^{-\lambda T} = \frac{1}{2}$$

\* expression de la période radioactive en fonction de  $\lambda$  :  $\Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda}$

- les périodes  $T$  des différents radioéléments couvrent un domaine très vaste :

\*  $T > 10^{30}$  ans pour le vanadium.

\*  $T < 2,96 \cdot 10^{-7}$  s pour  ${}_{84}^{212}\text{Po}$



## II. La radioactivité

### 4. la radioactivité

#### c) vie moyenne

- la vie moyenne d'un atome particulier est comprise entre  $t = 0$  et  $\infty$ .

- si  $N_0$  atomes sont présents à  $t = 0$ , il en reste à l'instant  $t$  :  $N_{(t)} = N_0 e^{-\lambda t}$

- entre  $t$  et  $t+dt$ , on a  $dN$  atomes qui se désintègrent :  $dN_{(t)} = -\lambda N_{(t)} dt$

→ durée de vie totale de l'ensemble des atomes est :  $dN_{(t)} \cdot t = -\lambda N_{(t)} \cdot t dt$

- **définition** : la **vie moyenne  $\tau$**  est la somme des durées de vie de tous les atomes divisée par  $N_0$  :

$$\tau = -\frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_{(t)} \cdot t dt$$

- en rappelant que  $N_{(t)} = N_0 e^{-\lambda t}$  (et après quelques heures de mathématiques), on peut montrer que :

→ la vie moyenne correspond au temps au bout duquel le nombre d'atomes a été divisé par  $e$

$$\overline{N_{(t)}} = \frac{N_0}{e}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

## II. La radioactivité

### 4. la radioactivité

#### d) activité

- **définition** : activité  $A_{(t)}$  est le nombre de désintégration par seconde.

$$A_{(t)} = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

**unité** : le Becquerel : 1Bq = 1 désintégration/seconde

ancienne unité : le Curie : 1Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq


- l'activité décroît rapidement au début de l'émission, pour se stabiliser vers la fin de l'émission.

- l'activité sert à la datation des objets archéologiques :

exemple : l'activité d'un fragment d'os humain actuel contenant du  $^{14}\text{C}$  est de 880Bq. Sachant qu'un fragment ancien a une activité de 110Bq, déterminer l'âge du fragment, sachant que la période  $T$  de  $^{14}\text{C}$  est de 5570 ans.

\* à  $t = 0$ ,  $A_0 = 880\text{Bq}$

\* à  $t$ ,  $A_{(t)} = 110\text{Bq} = A_0 e^{-\lambda t}$  ;  $T = \ln 2 / \lambda \Rightarrow \lambda = T / \ln 2$

  $t = 16713,5 \text{ ans}$

## II. La radioactivité

### 4. la radioactivité

*e) quantité de radionucléide correspondant à une activité désirée.*

\* en nombre d'atomes  $N$  :

- pour un radionucléide de période  $T$  dont l'activité est de 1Ci ( $=3,7 \cdot 10^{10}$ Bq), on peut déterminer le nombre de noyaux actifs :

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N = 3,710^{10} \Rightarrow N = \frac{3,710^{10}}{\ln 2} T$$

\* en masse :

- plus la période est longue, plus il faut une masse importante d'échantillon actif pour avoir 1Ci d'activité.  
( $N$  : nombre d'Avogadro)

$$M = \frac{A}{N} N$$

nucléide	période $T$	masse g/Ci
$^{226}\text{Ra}$	1600ans	1,02
$^{60}\text{Co}$	5,2ans	$9,1 \cdot 10^{-4}$
$^{32}\text{P}$	14,3jours	$3,5 \cdot 10^{-6}$

## II. La radioactivité

### 5. modes de transformation spontanée

- on peut classer les modes de transformations en 2 catégories :

➡ transformations isobariques (à  $A = \text{cste}$ )

➡ transformations par partition en 2 noyaux

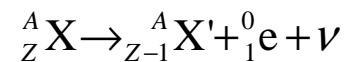
#### a) transformations isobariques : émission $\beta$

- **définition** : transformations sans changement du nombre de masse  $A$ .

➡ dû à un déséquilibre trop important entre neutrons et protons dans le noyau.

\* **émission  $\beta^+$**  : lorsque il y a un excès de protons dans le noyau.

- particule  $\beta^+$  ➡ **positron**  ${}^0_1\text{e}$  (même masse que l'électron mais de charge positive).



$\nu$  : **neutrino** (de charge et de masse nulle)

➡ dans cette transformation : un proton se transforme en neutron  ${}^1_1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_1\text{e} + \nu$

- exemple : désintégration du  ${}^{22}\text{Na}$  :  ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^0_1\text{e} + \nu$

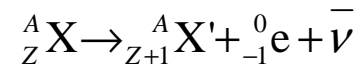
## II. La radioactivité

### 5. modes de transformation spontanée

#### a) transformations isobariques : émission $\beta$

\* émission  $\beta^-$  : lorsque il y a un **excès de neutrons** dans le noyau.

- particule  $\beta^-$   $\longrightarrow$  **électron**  $\begin{matrix} 0 \\ -1 \end{matrix} e$  éjecté du noyau.



$\bar{\nu}$  : **antineutrino** (de charge et de masse nulle)

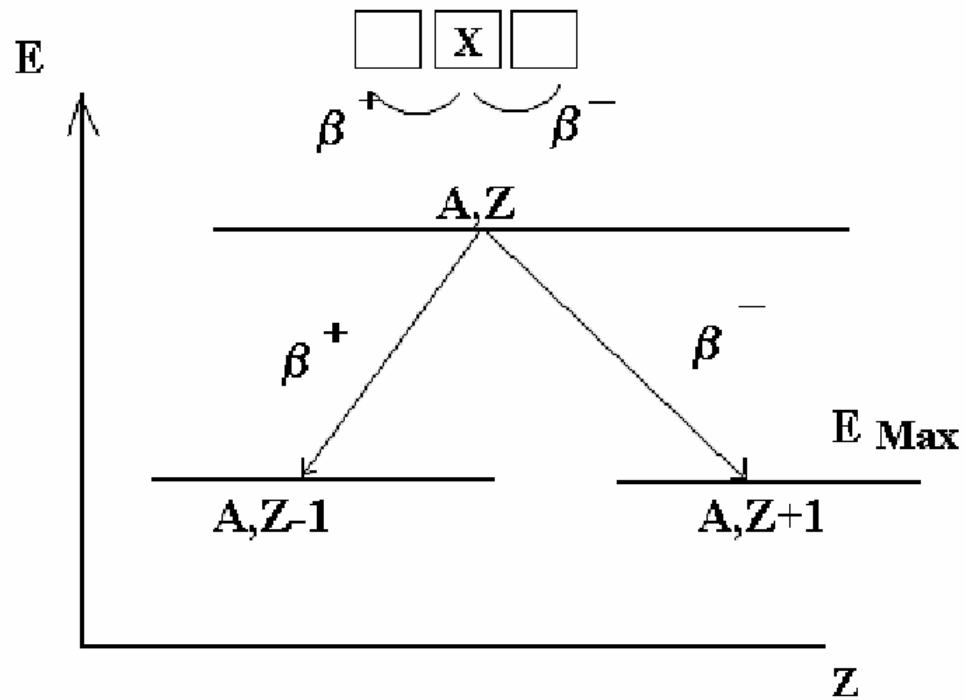
$\longrightarrow$  dans cette transformation : un neutron se transforme en proton

- exemple : désintégration du  ${}^{90}\text{Sr}$  :  ${}^{90}_{38}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39}\text{Y} + {}^0_{-1} e + \bar{\nu}$

## II. La radioactivité

### 5. modes de transformation spontanée

b) diagrammes d'énergie : représentation des émissions  $\beta^+$  et  $\beta^-$



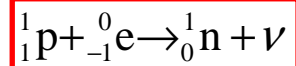
## II. La radioactivité

### 5. modes de transformation spontanée

#### c) capture électronique :

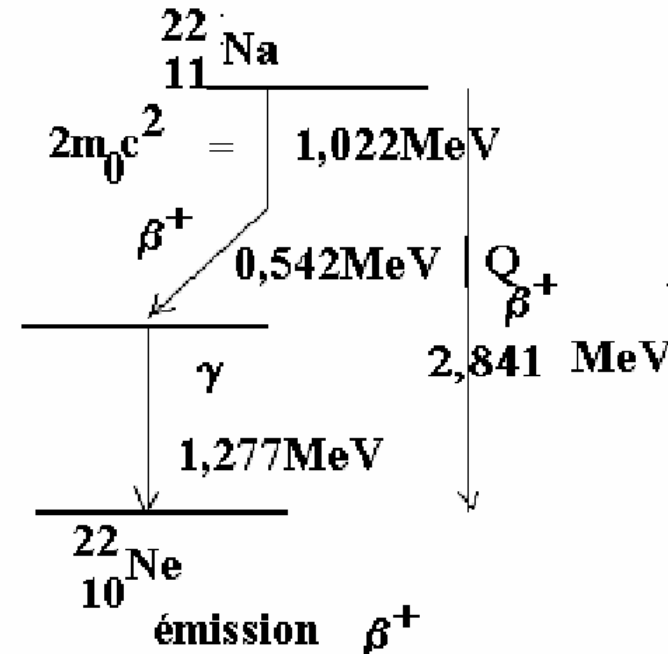
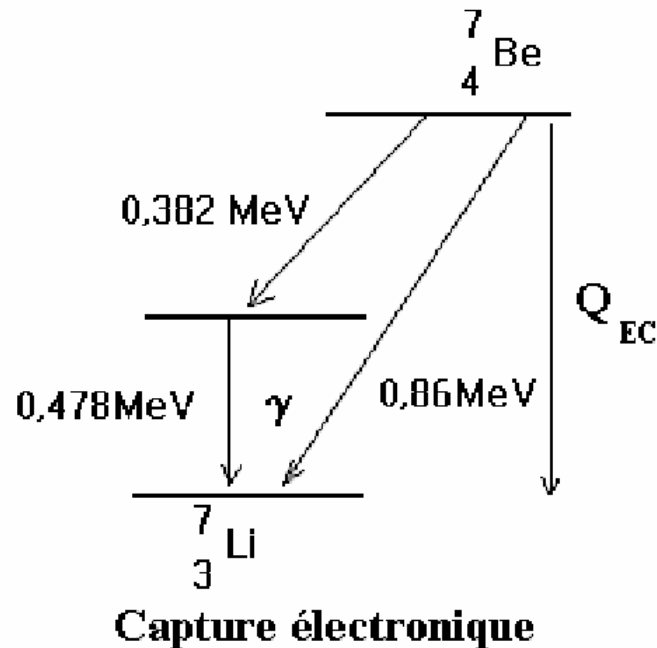
- il peut y avoir au lieu d'une émission d'une particule  $\beta^+$ , une **capture électronique** :

**définition : transformation d'un proton en neutron**



- le noyau résiduel est laissé dans un état excité après capture :

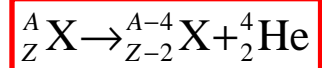
➔ la désexcitation se fera alors par émission d'un photon  $\gamma$ .



## II. La radioactivité

### 6. désintégration $\alpha$

➔ désintégration non isobarique, avec **émission d'un noyau d'hélium He** (particule  $\alpha$ )



#### a) énergie de la désintégration $\alpha$

- lors de la réaction, il y a **conservation de l'énergie** :

$$\boxed{m_X c^2 = m_X' c^2 + m_\alpha c^2 + E_\alpha + E_{m_X}}$$

$E_\alpha$  et  $E_{m_X}$  ➔ énergies de recul de la particule  $\alpha$  et du noyau fils.

- les noyaux émetteurs  $\alpha$  sont des noyaux lourds ➔  $A \approx 200$

- l'énergie totale, ou **énergie de désintégration  $\alpha$**  est :

$$\boxed{E_0 = E_\alpha \left( 1 + \frac{m_\alpha}{m} \right)} \quad \text{avec} \quad \frac{m_\alpha}{m} \approx 0,02$$

- l'énergie de désintégration  $\alpha$  varie dans une **bande étroite comprise entre 4MeV et 9 MeV** .



## II. La radioactivité

### 6. désintégration $\alpha$

#### *b) périodes des émetteurs $\alpha$*

- la période des émetteurs  $\alpha$  varie de  $10^{-7}$ s à  $10^{10}$ ans.

→ plus l'énergie est grande, plus la période est étroite.

nucléide	$E_\alpha$ (MeV)	période $T$
$^{232}\text{Th}$	4,05	$1,39 \cdot 10^{10}$ ans
$^{226}\text{Ra}$	4,88	$1,62 \cdot 10^3$ ans
$^{228}\text{Th}$	5,52	1,9 ans
$^{222}\text{Rn}$	5,59	3,83 jours
$^{218}\text{Po}$	6,12	3,05 min
$^{216}\text{Po}$	6,89	0,16s
$^{212}\text{Po}$	8,95	$3 \cdot 10^{-7}$ s

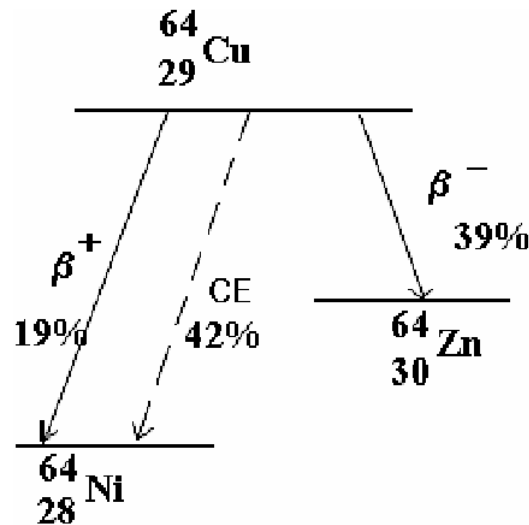
## II. La radioactivité

### 7. noyaux ayant plusieurs modes de désintégration

- certains noyaux ont plusieurs modes de désintégrations possibles :

- exemple : désintégration de  $^{64}\text{Cu}$ .

→ 3 modes possibles : émission  $\beta^+$ , émission  $\beta^-$  et capture électronique (CE).



\* chaque mode de désintégration est caractérisé par sa **probabilité partielle par unité de temps** :

$$\lambda_{\beta^-} \quad \lambda_{\beta^+} \quad \lambda_{\text{CE}}$$

\* chacune de ces probabilités est indépendante :

→ constante de désintégration totale pour  $^{64}\text{Cu}$  :  $\lambda = \lambda_{\beta^+} + \lambda_{\beta^-} + \lambda_{\text{CE}}$

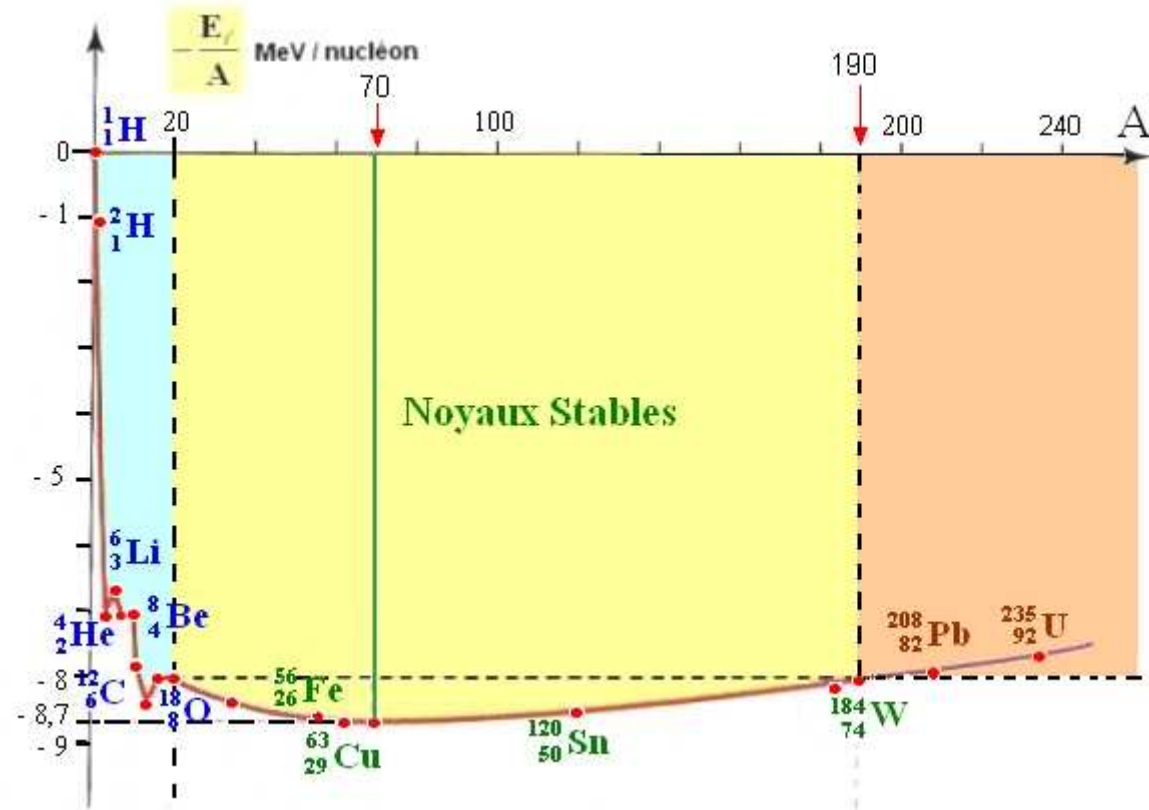
\* **définition** : rapport d'embranchement

$$R_{\beta^-} = \frac{\lambda_{\beta^-}}{\lambda}; R_{\beta^+} = \frac{\lambda_{\beta^+}}{\lambda}; R_{\text{CE}} = \frac{\lambda_{\text{CE}}}{\lambda}$$

\* ces rapports pour  $^{64}\text{Cu}$  sont 39% ( $\beta^-$ ), 19% ( $\beta^+$ ) et 42% (CE).

## II. La radioactivité

### 8. un petit résumé...



énergie de cohésion par nucléon en fonction du nombre de masse  $A$

## II. La radioactivité

### 8. un petit résumé...

