

# I-Radioactivité

# **I - Introduction**

## ***a. La radioactivité dans la nature***

La radioactivité est d'origine naturelle. L'intégralité des éléments présents sur Terre, y compris les noyaux radioactifs, ont été formés :

- dans la phase de nucléosynthèse aux premiers instants de l'univers, pour les éléments légers (hydrogène et hélium),
- dans les étoiles, pour les éléments jusqu'au fer,
- lors de l'explosion des étoiles, marquant la fin de vie de celles-ci, pour les éléments au-delà du fer.

La radioactivité est à l'origine de l'apparition de la vie sur Terre.

C'est la chaleur qu'elle génère qui maintient le noyau terrestre sous forme liquide, et qui a permis lors des éruptions volcaniques la formation de l'atmosphère primitive (protection contre les météorites, effet de serre pour diminuer les écarts thermiques entre le jour et la nuit).

C'est aussi la radioactivité qui entretient la combustion au sein du soleil, par le biais des réactions thermonucléaires où l'hydrogène est transformé en hélium.

## ***b. La radioactivité et l'homme***

Depuis plus d'un siècle, l'homme a découvert l'existence de la radioactivité. Il a su exploiter l'énergie fabuleuse cachée au cœur de la matière, avec plus ou moins de bonheur, et même créer de nouveaux éléments qui n'existent pas sur Terre !

Quelques applications :

- énergétiques : centrales nucléaires à fission,
- médicales : utilisation de traceurs radioactifs pour les diagnostics, traitement des cancers,
- biologiques / géologie : études in vivo à l'aide de marqueurs radioactifs, datation
- militaires : bombes nucléaires à fusion ou à fission

## ***c. Ordres de grandeur***

On va comparer les grandeurs physiques du monde atomique avec celles du monde subatomique.

### **Echelles de distance ( $1 : 10^{-5}$ )**

La taille des atomes est de l'ordre de  $10^{-10}$  m ou 1 Å.

La taille des noyaux est de l'ordre de  $10^{-15}$  m ou 1 fermi (fm).

## Echelle de masse volumique ( $1 : 10^{14}$ )

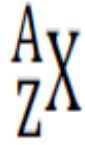
La quasi totalité de la masse d'un atome est concentrée dans le noyau. Pour rendre compte de la compacité du noyau, on peut comparer la masse d'un volume d'un centimètre cube (un dé à coudre) rempli d'atomes de fer, et de noyaux de fer :

- masse d'un  $\text{cm}^3$  d'atomes de fer : 7,874 g
- masse d'un  $\text{cm}^3$  de noyaux de fer  $\approx 2,125 \times 10^{14}$  g soit plus de 200 millions de tonnes dans un dé à coudre !!! On peut trouver dans l'univers des objets aussi denses, sous la forme d'étoiles à neutrons.

## Echelle d'énergie ( $1 : 10^6$ )

Si compare les énergies en jeu au sein des atomes et des noyaux d'atomes, on observe que l'énergie de liaison des électrons au noyau est environ un million de fois plus petite que l'énergie de liaison qui assure la cohésion des protons et des neutrons au sein du noyau.

## REPRESENTATION DES PARTICULES EN PHYSIQUE NUCLEAIRE :



Z : numéro atomique ( nombre de charges élémentaires (e)). Ce n'est plus le nombre de protons comme en chimie.

Dans le cas où X est un élément chimique, alors Z représente aussi le nombre de protons dans le noyau.

A : nombre de masse.

### Exemples :

- Le carbone est représenté par :  ${}^{12}_6C$ , ici Z=6, donc la charge du noyau est égale à +6e et le nombre de protons est égal à 6.

Le positon est représenté par :  ${}^0_{+1}e$ , ici Z=1, donc la charge du positon est égale à +e, mais le nombre de protons est égal à 0, car le positon n'est pas un élément chimique. Et il ne contient pas de protons.

## DEFINITIONS :

**NUCLEIDE :** Un **nucléide** est un type de noyau atomique caractérisé par le nombre de protons et de neutrons qu'il contient.

**Isotopes :** Noyaux ayant le même nombre de protons mais pas le même nombre de neutrons.  ${}^{12}_6C, {}^{13}_6C, {}^{14}_6C$

**Isobares :** Noyaux ayant le même nombre de masse A mais pas le même nombre de protons.  ${}^{17}_7N, {}^{17}_8O, {}^{17}_9F$

**Isotones :** Noyaux ayant le même nombre de neutrons.  ${}^{13}_6C, {}^{14}_7N$ .

**Isomères :** Noyaux ayant le même nombre de masse et le même numéro atomique, mais pas la même énergie interne, ils possèdent des énergies internes différentes.  ${}^{99}_{43}Tc, {}^{99m}_{43}Tc$ .

Le technétium 99m ( ${}^{99m}_{43}Tc$ ) est un isomère du  ${}^{99}_{43}Tc$ . On dit qu'il est métastable, car il possède une énergie interne supérieure à celle du  ${}^{99}_{43}Tc$ . Il se désintègre en émettant un rayonnement  $\gamma$  de 140 KeV.

## PRINCIPALES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

- Il existe 5 principaux types de transformations radioactives:

Emission  $\alpha$

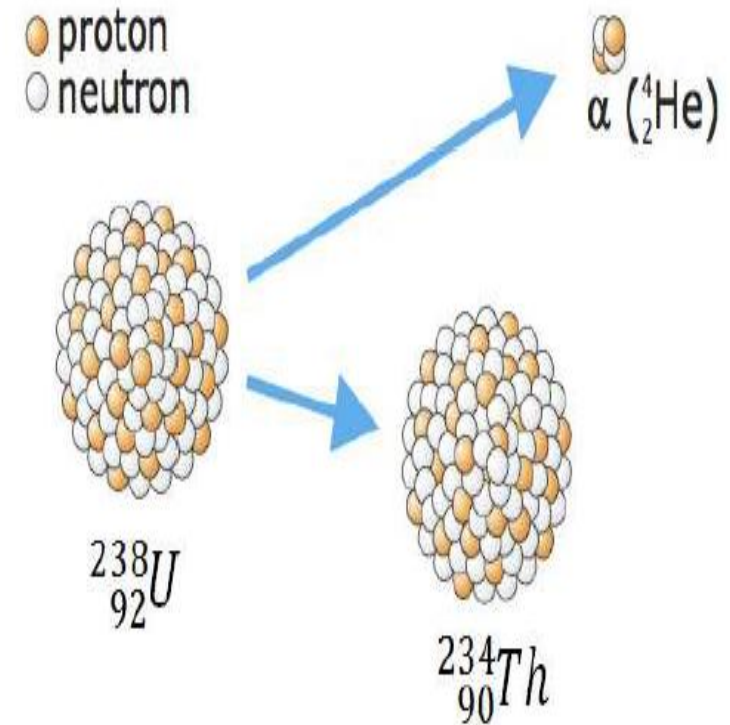
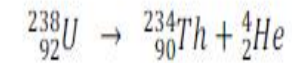
Emission  $\beta^-$

Emission  $\beta^+$

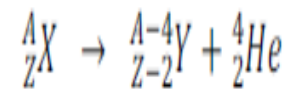
Emission  $\gamma$

Capture électronique

Exemple :



- La désintégration alpha ( $\alpha$ )** : entraîne l'émission d'un rayonnement  $\alpha$  (noyau d'hélium ( ${}^4_2\text{He}$ )). Les périodes des désintégrations  $\alpha$  sont souvent longues.

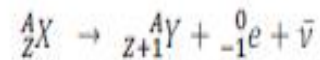


**La désintégration bêta ( $\beta$ ) :** entraîne l'émission d'un rayonnement  $\beta$ .

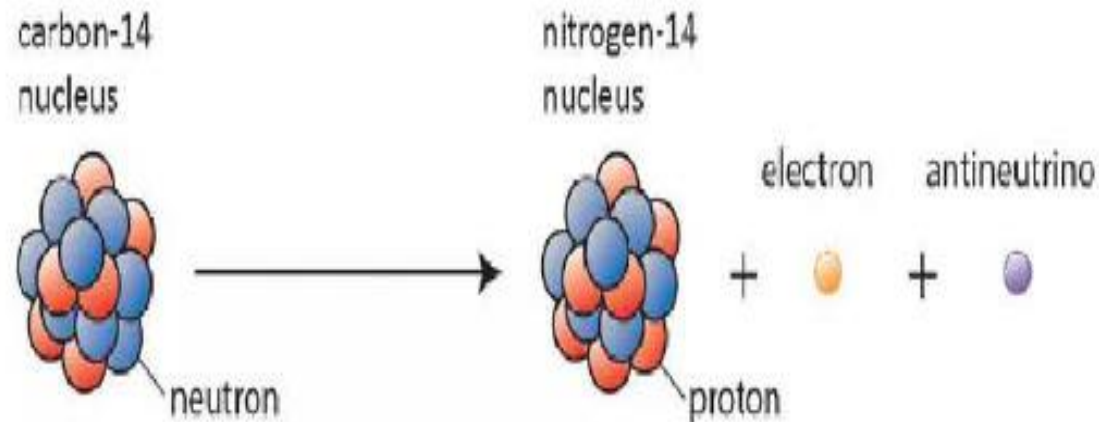
Un rayonnement  $\beta$  est soit un électron ( $e^-$ ) soit un positon ( $e^+$ ). De ce fait il y a deux types de désintégrations  $\beta$ , la désintégration  $\beta^-$  et la désintégration  $\beta^+$ .

### 1- La désintégration bêta ( $\beta^-$ ) :

Lorsque dans le noyau il y a un excès de neutrons, alors l'un d'eux se transforme en proton. Il y a émission d'un électron et d'un antineutrino ( ${}^0_0\bar{\nu}$ )

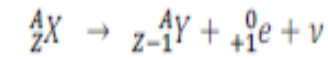


Exemple :

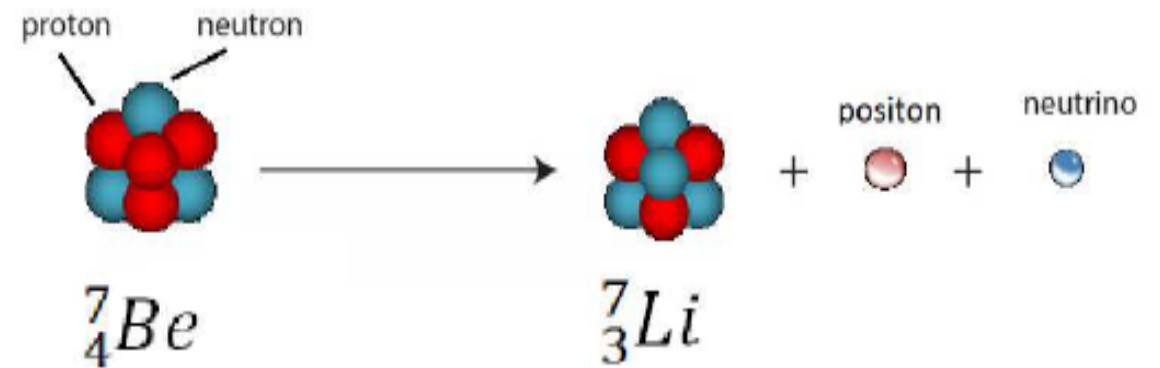
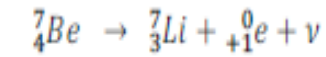


### 2- La désintégration bêta ( $\beta^+$ ) :

Lorsque dans le noyau il y a un excès de protons, l'un d'eux se transforme en neutron. Il y a émission d'un positon et d'un neutrino ( ${}^0_0\nu$ ).

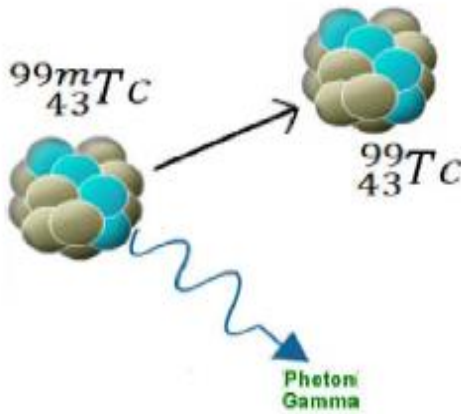
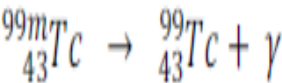


Exemple :



La désintégration gamma ( $\gamma$ ) : correspond à l'émission de photons énergétiques.

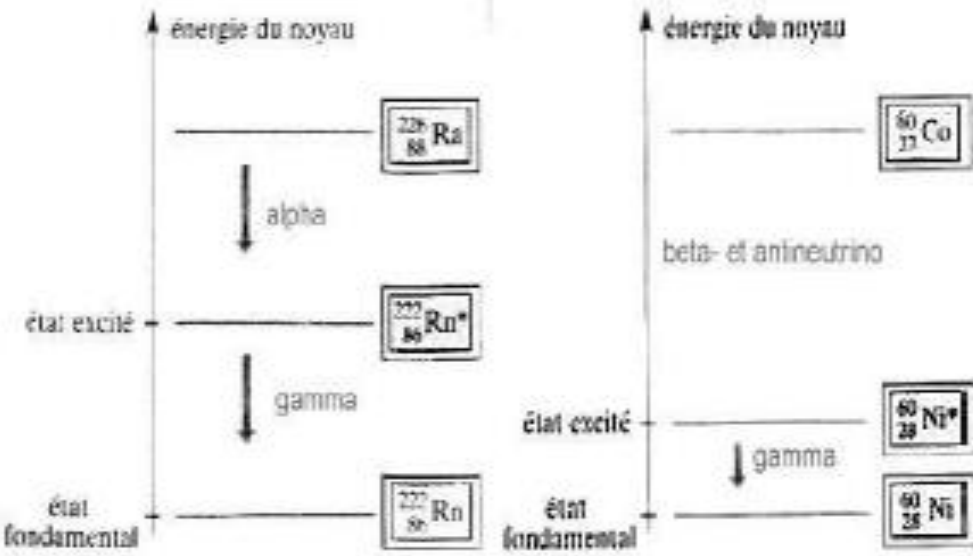
$${}^mX \rightarrow X + \gamma$$

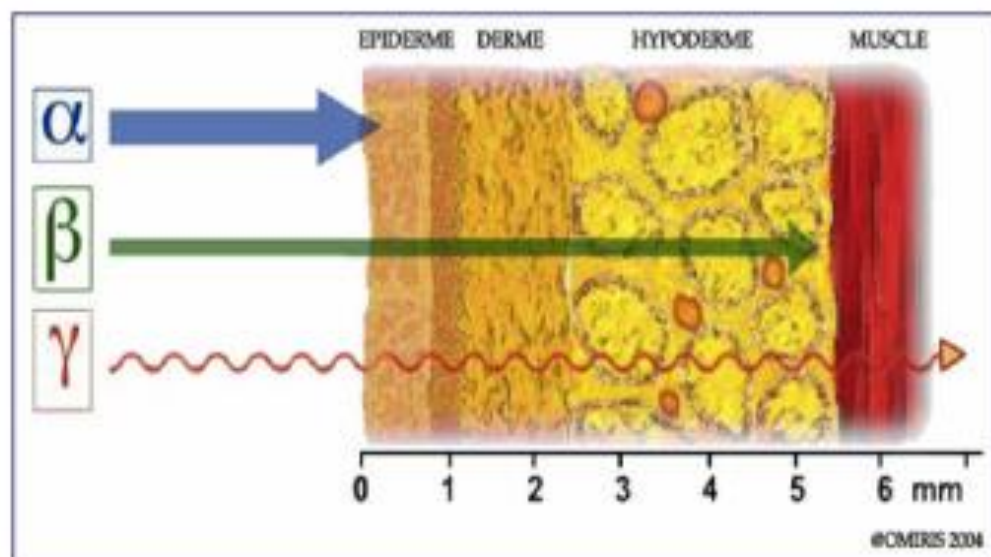


**IMPORTANT :**

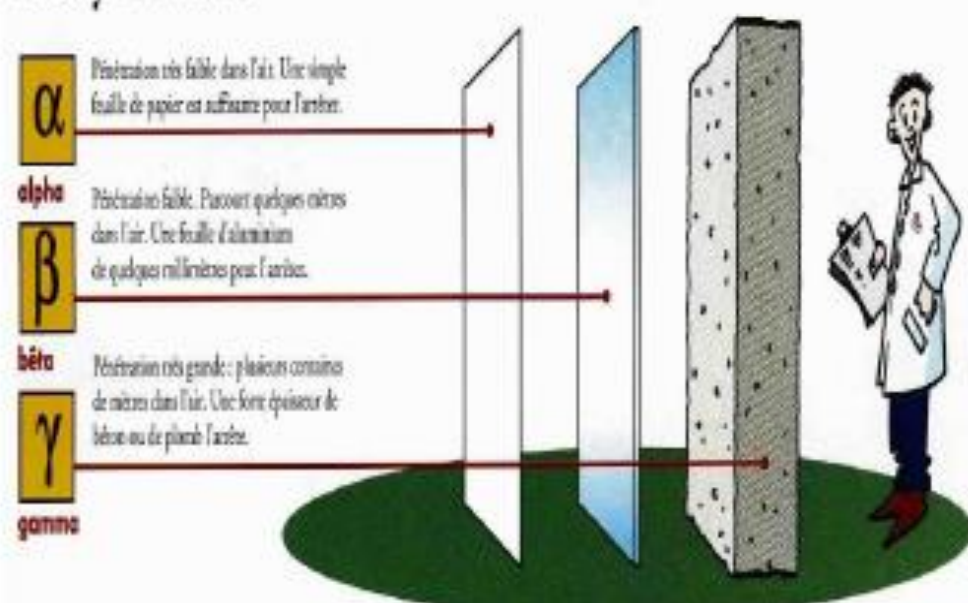
Les désintégrations  $\alpha$  et  $\beta$  sont souvent accompagnées de l'émission d'un ou plusieurs rayons  $\gamma$ .

- Le noyau fils est en général obtenu dans un état excité (niveau d'énergie élevé), il est noté  $Y^*$ .
- Cet état est instable, le noyau se désexcite en évacuant cette énergie excédentaire, en émettant un rayonnement électromagnétique  $\gamma$  (particules très énergétiques appelées photons).
- Equation d'une émission  $\gamma$  :  $Y^* \rightarrow Y + \gamma$
- Possèdent un très grand pouvoir de pénétration.
- Sont arrêtés par une forte épaisseur de béton ou de plomb.





## Le pouvoir de pénétration des rayonnements

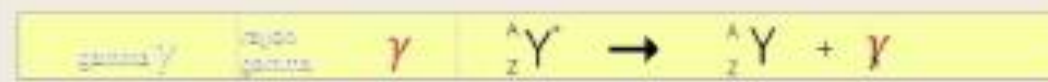


## Désintégration radioactive

Lois de conservations vérifiées



Type de radioactivité	particule émise	Équation de réaction du type
alpha $\alpha$	noyau d'hélium (particule alpha $\alpha$ )	${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$
bêta + $\beta^+$	positon (ou positron) ${}^0_1 e^+$	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 e^+$
bêta - $\beta^-$	électron ${}^0_{-1} e^-$	${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e^-$

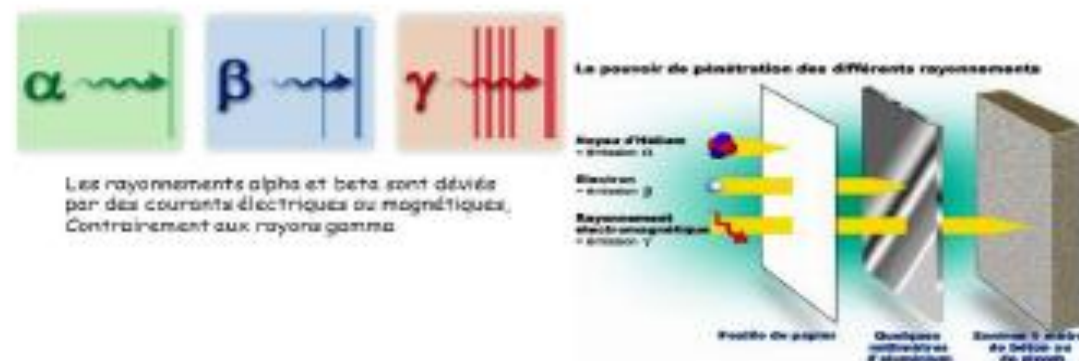


## Les trois types de rayonnements radioactifs

Rayons peu pénétrants  
Rayons alpha  
Émission d'un noyau d'He  
Portée dans l'air = 2,5 à 8,5 cm  
Arrêtés par une feuille de papier  
Ou la surface externe de la peau

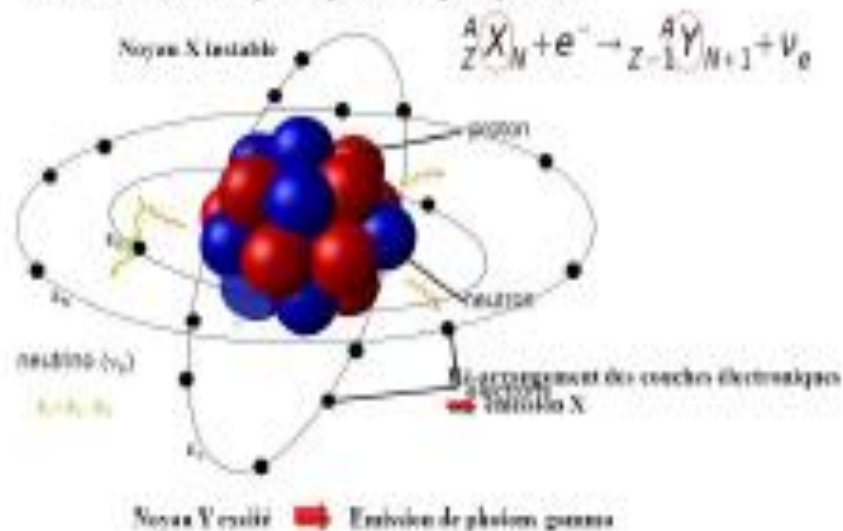
Rayons un peu plus pénétrants  
Rayons bêta  
Émission d'un électron  
Portée dans l'air = quelques m  
Traverse la couche supérieure de la peau  
Arrêtés par une feuille de Al ou une vitre

Rayons très pénétrants  
Rayons gamma  
Nature électromagnétique  
Arrêtés seulement par de grandes épaisseurs de matériaux (béton, plomb...)



## Capture électronique

Elle concerne les noyaux qui ont trop de protons.



C'est la capture d'un électron d'une couche profonde K ou L par le noyau, au sein duquel il se combine à un proton pour donner un neutron.

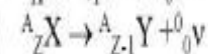
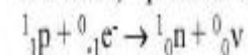
L'équation:



- **Concerne les éléments instables avec excès de protons (zone B)**
  - Éléments légers de la zone B = émission  $\beta^+$
  - Éléments lourds de la zone B = capture électronique
- **La capture électronique peut aboutir à des nucléides radioactifs excités qui retournent à l'état fondamental par émission  $\gamma$ .**



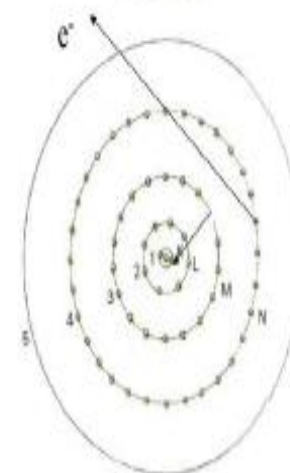
- Capture électronique (généralement couche K) : possible sans seuil de  $\Delta E$



Emission de photons X de fluorescence du fait de la vacance électronique.

$$E_{hv} = E_K - E_L = (E_K - E_M) + (E_M - E_L) \dots$$

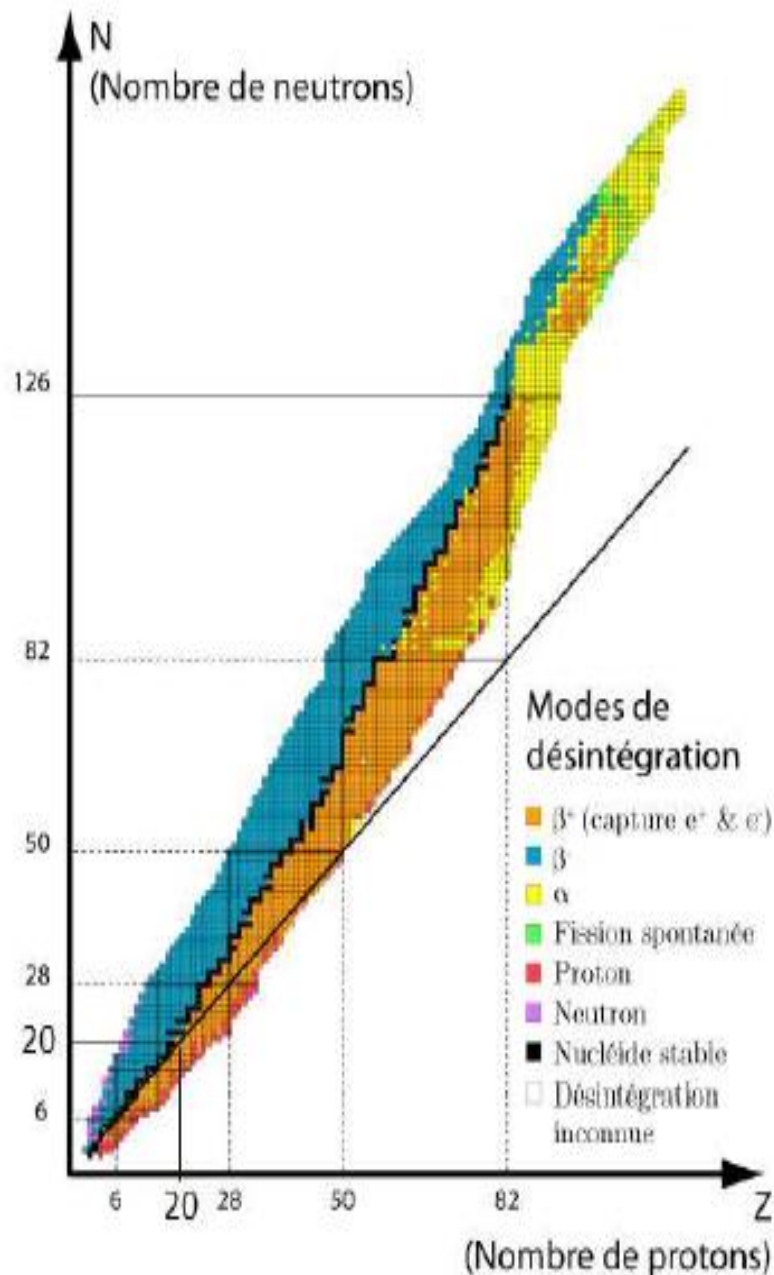
et/ou d'électrons Auger.



Applications médicales :

- Photons X parfois utilisables pour imagerie, le plus souvent pour comptage radioimmunologie ...
- Electrons Auger pour radiothérapie au niveau cellulaire car parcours dans l'eau très court (ordre du  $\mu\text{m}$ ).

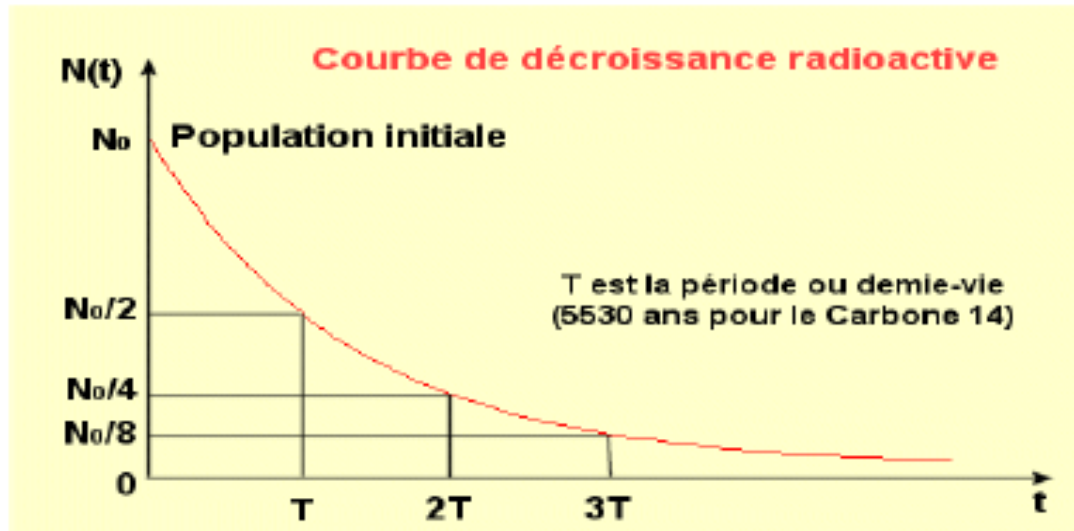
## LA CARTE N-Z :



Le graphique représentant le nombre de neutrons en fonction du nombre de protons est appelé carte N-Z, on y distingue plusieurs zones différentes:

- Les noyaux stables ("vallée de la stabilité") (noyaux représentés en noir dans le graphique):  
Pour  $Z < 20$ , les noyaux stables se situent au voisinage de la droite  $Z=N$   
Pour  $Z > 20$ , le nombre de neutrons augmente plus vite que le nombre de protons, les noyaux stables se situent au-dessus de cette droite.
- Les noyaux instables sont séparés en 3 cas:
  1. Excès de neutrons (au-dessus de la vallée de la stabilité) (zone bleue), les radionucléides appartenant à cette zone se désintègrent par émission d'un électron: particules  $\beta^-$
  2. Défaut de neutrons (en dessous de la vallée de la stabilité) (zone orange), les radionucléides appartenant à cette zone se désintègrent par émission d'un positon, ils sont radioactifs  $\beta^+$ .
  3. Noyaux ayant un défaut de neutrons et dont  $A > 170$  se désintègrent par émission  $\alpha$ .

# Loi de décroissance radioactive :



- Considérons une population de nuclides radioactifs d'effectif initial  $N_0$  et de constante radioactive  $\lambda$

- Le nombre de nuclides décroît de manière exponentielle selon la formule :  $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

## $\lambda$ - Constante radioactive $\lambda$ :

- Le nombre d'atomes radioactifs impliqués dans un protocole diagnostique ou thérapeutique est toujours très grand.
- La probabilité qu'un nuclide dans un état donné subisse une transformation radioactive entre les instants  $t$  et  $t + \Delta t$  est de la forme:  $P(\Delta t) = \lambda \Delta t$

$\lambda$  : - constante radioactive (  $s^{-1}$  ou  $j^{-1}$  ou années $^{-1}$  )

- dépend de la nature du nuclide et de son niveau d'énergie

## $T$ - Période (T) ou temps de demi-vie :

-  $T$  est le temps au bout duquel l'effectif de la population de radioéléments est réduit de moitié.

- Exprimé en secondes, jours ou années.

$$N(T) = N_0 / 2$$

### Activité (A):

C'est le nombre de transformations radioactives par unité de temps, ou nombre de désintégrations par seconde.

$$A(t) = \lambda \cdot N(t)$$

Unité: Becquerels (Bq; 1 Bq = 1 désintégration par seconde )

le curie (Ci; 1 Ci =  $3.7 \times 10^{10}$  Bq )

L'**activité** d'un échantillon de matière radioactive est définie par le nombre des désintégrations par unité de temps qui se produisent en son sein à chaque instant. Cette activité est une caractéristique primordiale de cet échantillon avec la nature des rayons émis. Elle représente sa « radioactivité de base ». Quand l'échantillon contient plusieurs éléments, l'activité totale est la somme des activités de chaque élément.

$$A_c = \frac{-dN}{dt} = \lambda \cdot N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A_c(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad : \quad A_0 = \lambda N_0$$

$A_c$  : activité au temps  $t$ .

$A_0$  : activité initiale.

