



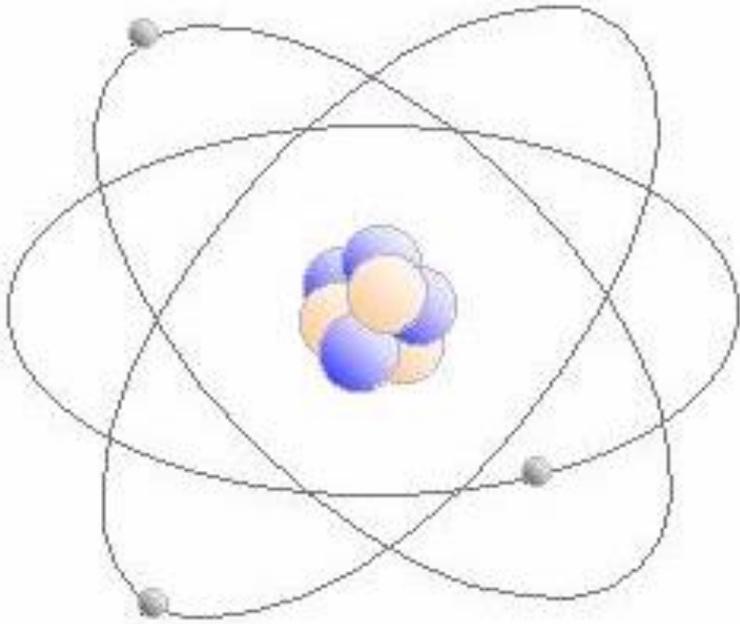
# LA RADIOACTIVITE

**Pr. S.M.MEGHELLI**

**Maitre de conférences A**

**Biophysique- Médicale**

**Faculté de médecine de Tlemcen**



# La radioactivité

Qu'est-ce que c'est ?

C'est dangereux ?

A quoi ça peut servir ?

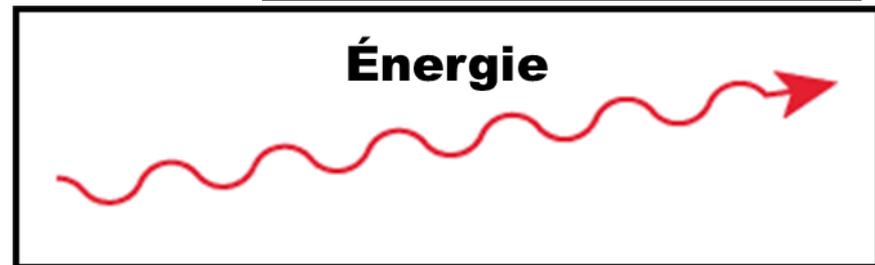
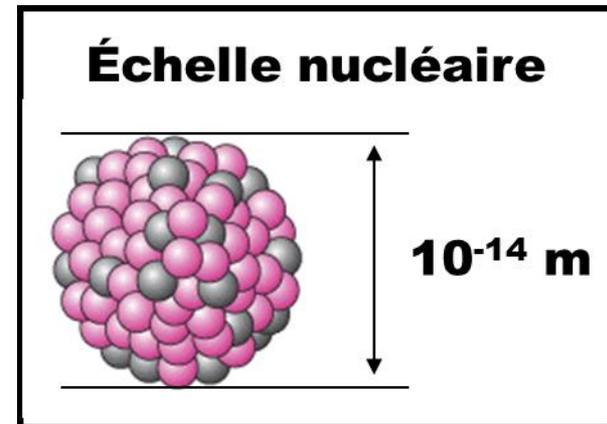
# Définition

**Propriété de certains éléments chimiques d'émettre des rayonnements, cette propriété est due à l'instabilité du noyau atomique**

➤ Objets mis en jeu :

- noyau atomique

- rayonnements



▶ applications médicales de la radioactivité



## Henri BECQUEREL

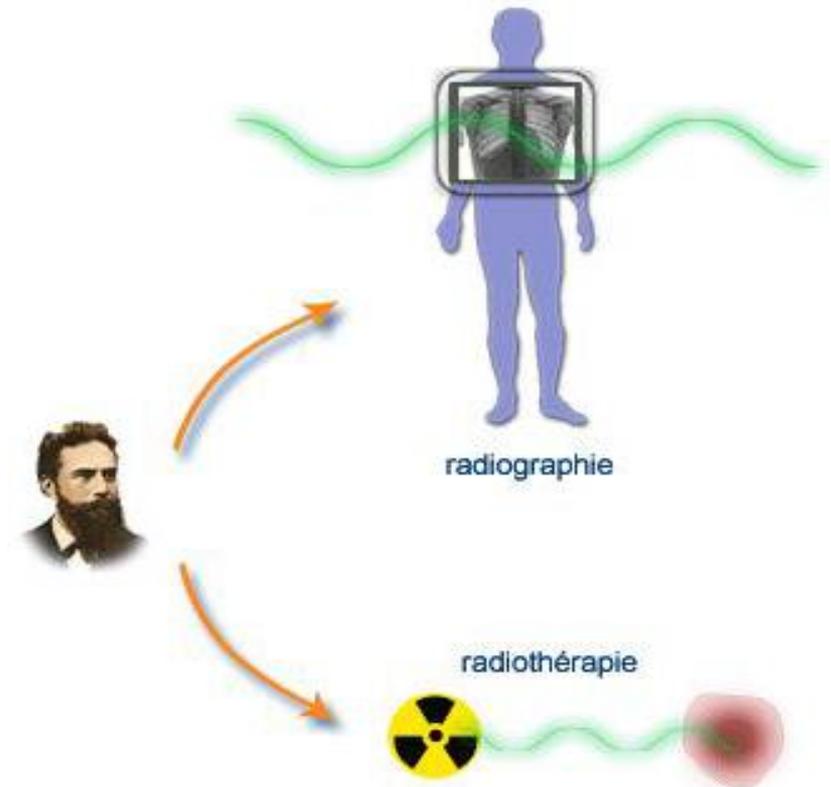
En 1896, il découvre «par hasard...» que l'uranium possède une activité radiante qu'on nommera **radioactivité**



- Dans les années suivantes, Pierre et Marie CURIE découvrent que d'autres corps sont radioactifs (thorium, radium, polonium...)
- En 1934, Irène et Frédéric JOLIOT-CURIE découvrent la radioactivité artificielle.

- 1ères radiographies et tentatives de radiothérapie dès 1896
- Accidents cutanés dans les mois qui suivent
- 1er cas de cancer cutané radio-induit en 1902
- 1902 à 1907, 170 cas de lésions diverses imputables aux Rayonnements Ionisants recensés
- Création du 1er comité de protection des personnes en 1921

## Un peu d'histoire

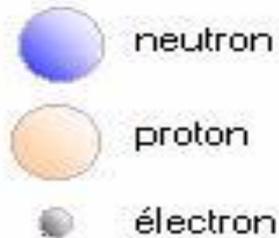
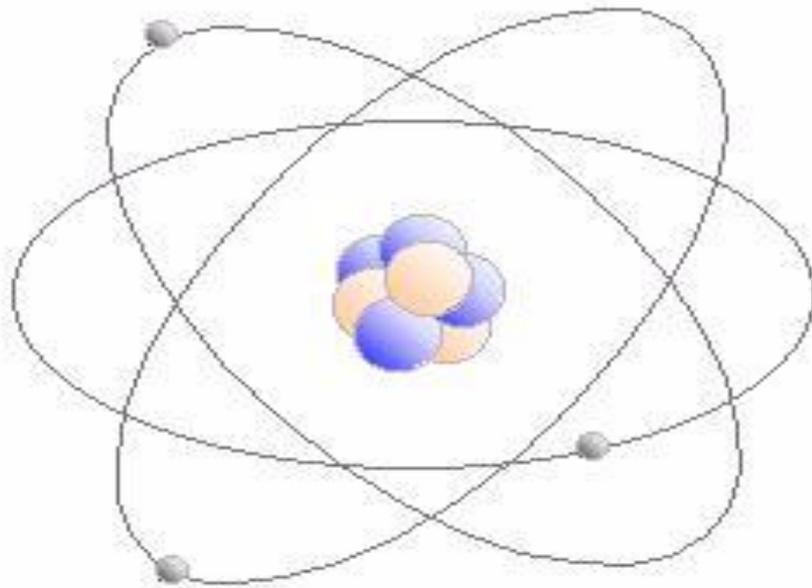




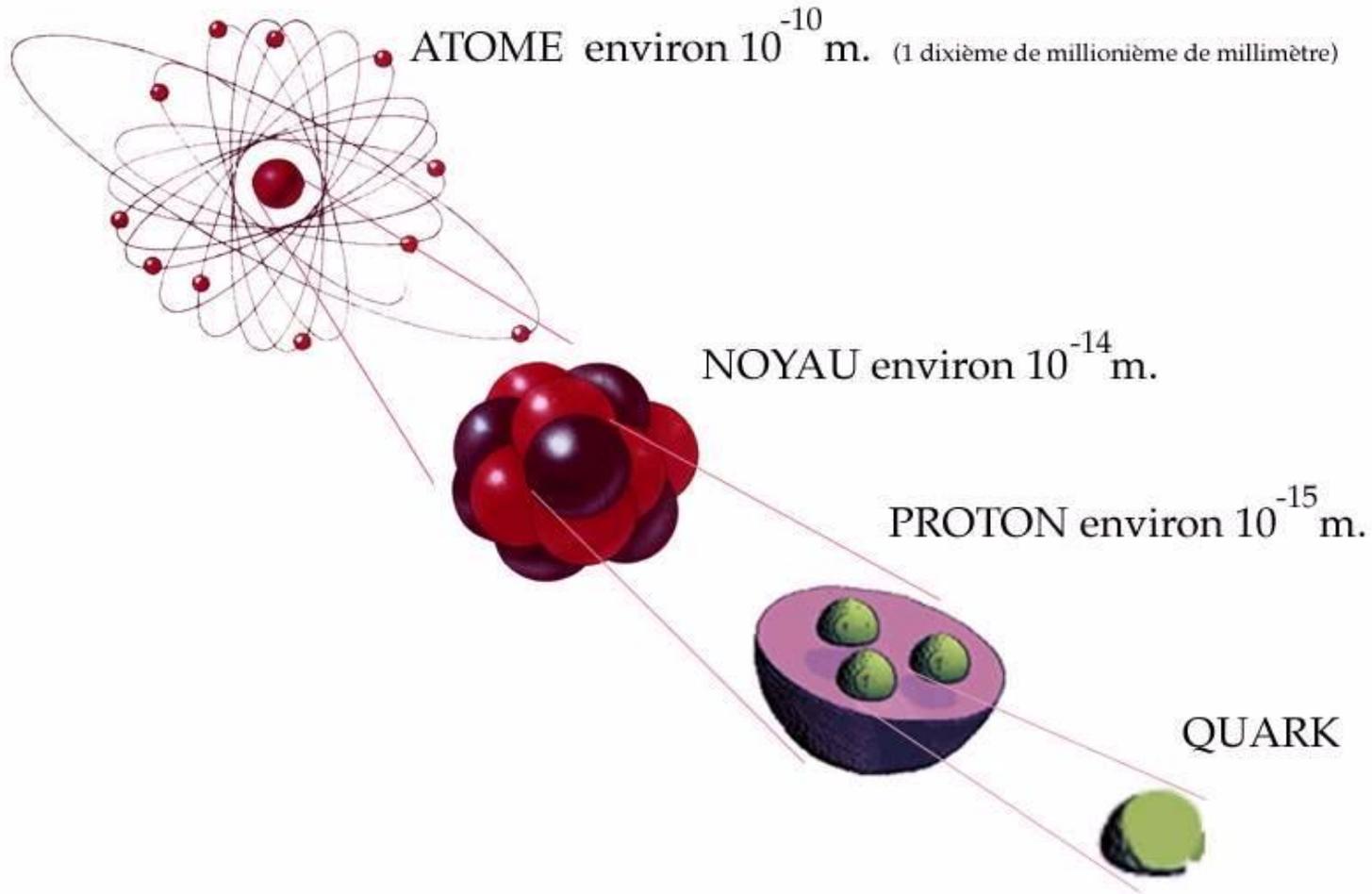
**Accident cutané**

## La radioactivité est un phénomène

### d'origine nucléaire



- Les noyaux des atomes sont constitués de protons et de neutrons (nucléons).
- Un atome est radioactif si son noyau se transforme spontanément en un autre noyau, en émettant ce qu'on appelle un rayonnement mais qui est en fait une particule.



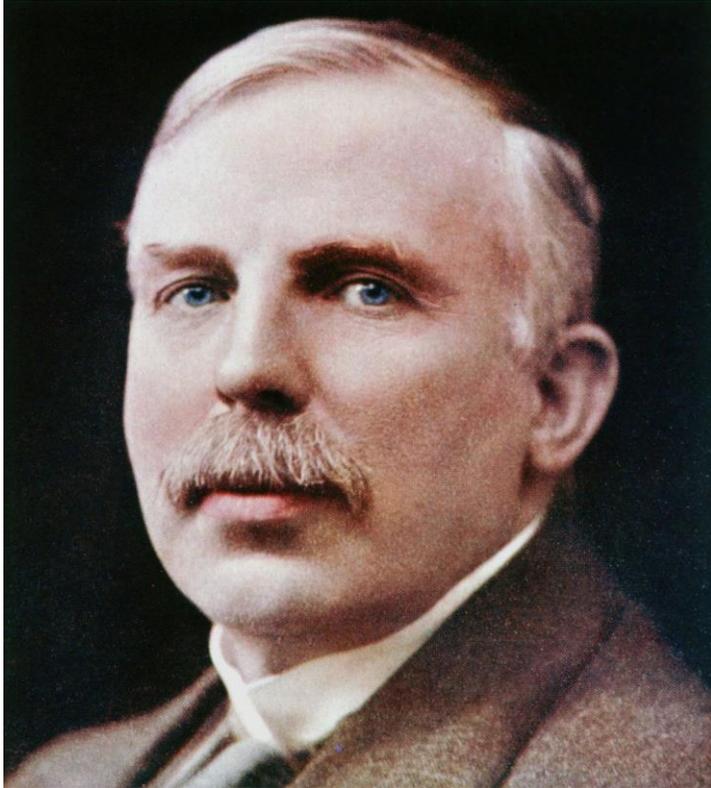
Il y a environ onze milliards de milliards d'atomes de fer dans un milligramme de fer !

# I) PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLÉAIRE

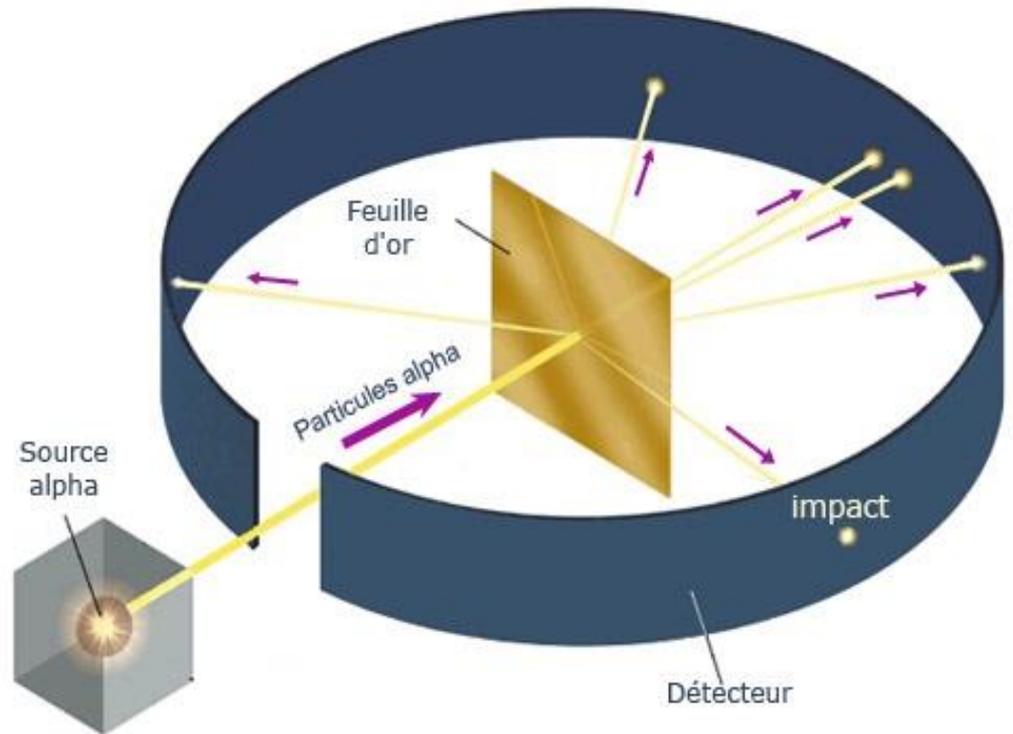
## 1.1 structure des atomes

- Au début du 20e siècle, il est connu que la matière est formée d'entités bien définies, non subdivisibles : les atomes, petites sphères de matière d'un diamètre de  $10^{-10}$  m.
- Les premiers modèles des atomes décrivaient les atomes comme étant des sphères, formées de matière chargée positivement et des électrons chargés négativement pour garantir la neutralité de l'ensemble.
- La révolution arriva quand Ernest Rutherford fit sa célèbre expérience :

## 1.2 l'expérience de Rutherford



**Ernest Rutherford**



# Interprétation de l'expérience

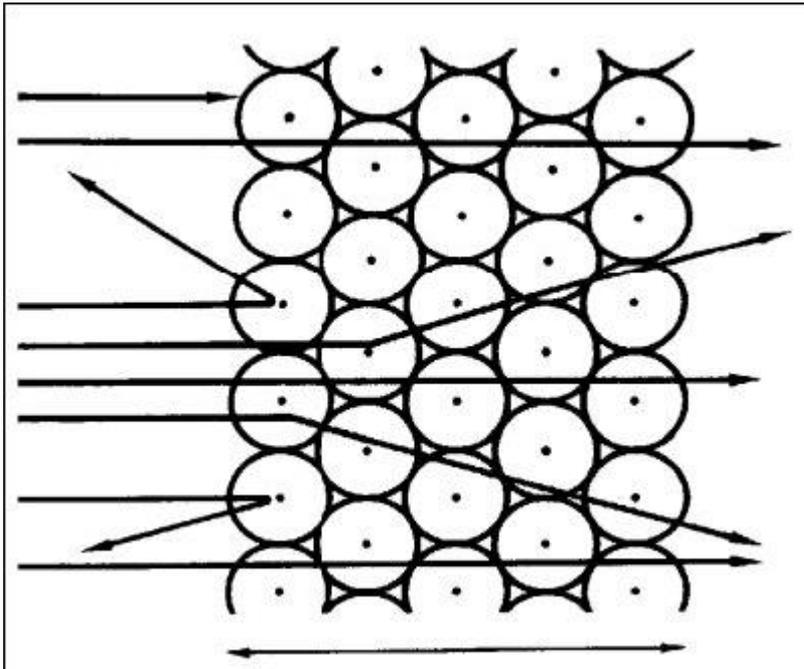
- Cette expérience amena Rutherford à concevoir le **modèle lacunaire de l'atome** :

→ comme la plus grande partie des projectiles traversent la cible en ligne droite, Rutherford admit qu'ils n'avaient pas rencontré d'obstacle au passage à travers l'atome.

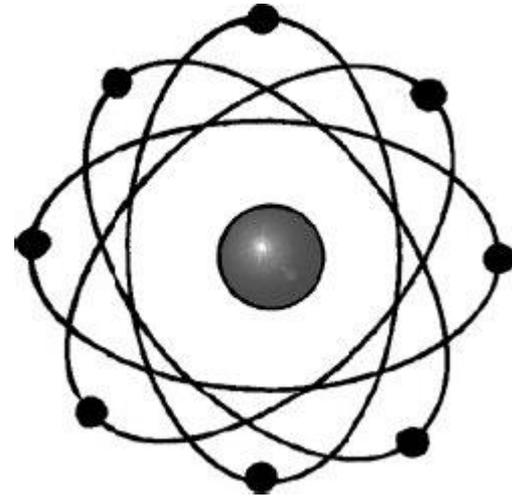
→ la très forte déviation de certaines particules alpha révèle l'existence d'un obstacle massif, mais de très petite dimension à l'intérieur de l'atome : **le noyau atomique**.

Tout comme le noyau de l'atome d'or, les particules alpha sont chargées positivement : elles sont écartées de leur trajectoire initiale d'autant plus qu'elles frôlent le noyau atomique de plus près.

# Suite



Feuille d'or  
bombardée



l'atome selon Rutherford

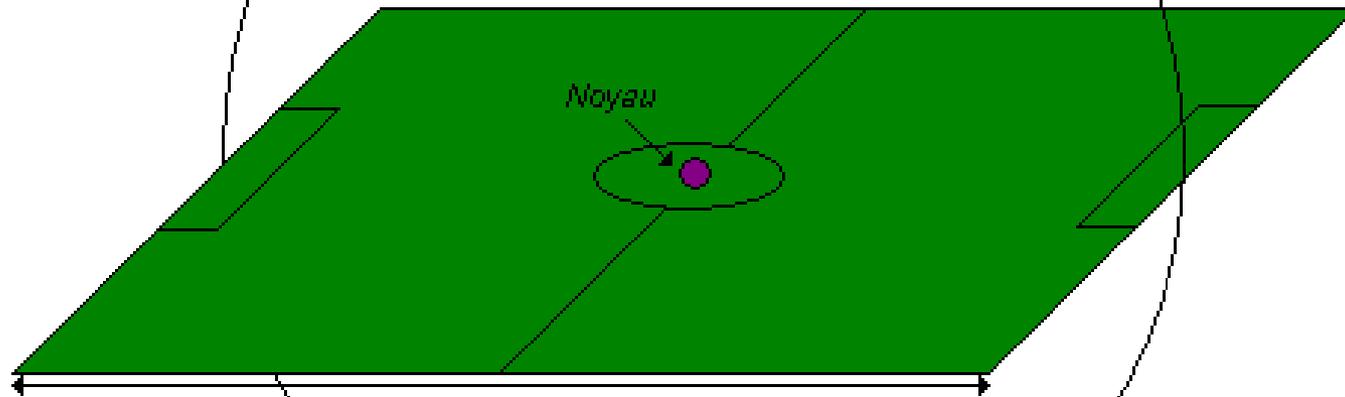
- Dans le modèle atomique de Rutherford, l'atome apparaît comme une sphère :
  - dont le volume est délimité par le cortège des électrons chargés négativement
  - dont la masse est localisée dans un minuscule noyau central chargé positivement.
- Pour expliquer que les électrons de charge négative restent à distance du noyau positif, il faut admettre que les électrons sont animés d'un mouvement de rotation autour du noyau central : la force centrifuge ainsi engendrée équilibre l'attraction entre charges de signes opposés.

- C'est le modèle planétaire de l'atome : le noyau étant comparable au soleil et les électrons aux planètes.
- D'après la proportion des rayons alpha déviés par rapport à ceux qui passent en ligne droite, **Rutherford** a réussi à déterminer la taille du noyau : le diamètre du noyau est environ 100 000 fois plus petit que le diamètre de l'atome, soit  **$10^{-15}$**  .
- L'atome est presque entièrement constitué de vide.

# Atome: structure lacunaire

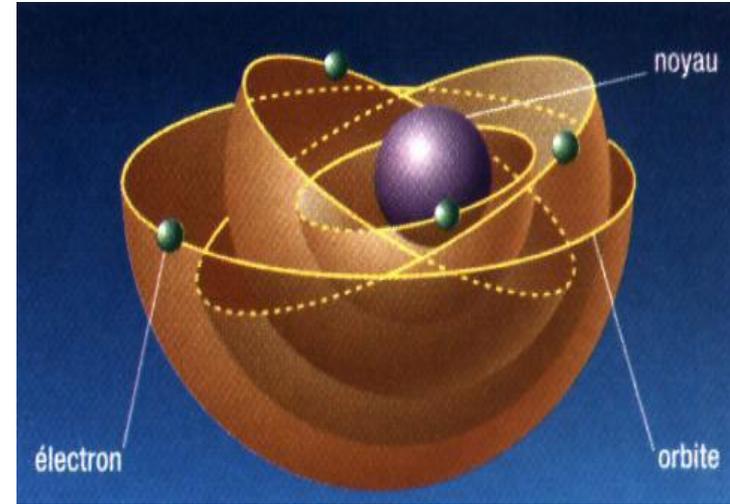
*Pourtour du nuage de l'atome*

*Si l'on grossissait un atome d'hydrogène  
aux dimensions d'un terrain de football,  
le noyau pourrait être représenté par une bille.*



*Tout l'espace qui sépare  
les noyaux des électrons est vide*

## 1.3 Système quantique: Atome de Bohr



**Bohr** proposa une modification au modèle atomique de Rutherford.

→ Premièrement, il **ajouta les neutrons** qui se trouvaient dans le noyau avec les protons. Les neutrons étaient une sorte de ciment qui empêchait les protons de se dissiper.

→ **Niels Bohr situait les électrons sur des orbites appelés couches électroniques** ou niveaux énergétiques. Des orbites quantifiés par un nombre  $n$  ( $n=1 \rightarrow K$ ,  $n=2 \rightarrow L$ ,  $n=3 \rightarrow M$ ). Chaque couche électronique peut contenir un nombre maximum d'électrons égal à  $2n^2$ .

→ **Lorsque les électrons reçoivent de l'énergie de l'extérieur, ils passent à une orbite plus haut** (plus éloigné du noyau). L'électron peut revenir à son emplacement initial en libérant l'énergie qu'il a absorbée ( $E_f - E_i$ ).

## 1.4 la structure du noyau atomique

- Dans les années à venir, les physiciens ont découvert que le noyau lui-aussi présente une structure bien définie.
- Le noyau d'un atome est constitué de **protons** et de **neutrons**, **particules élémentaires qui portent toutes le nom de nucléons.**
- Le noyau de l'atome d'hydrogène est un cas particulier, puisqu'il ne comporte qu'un seul proton.
- Le numéro atomique **Z**, qui est égal au nombre de protons dans le noyau, est caractéristique de chaque élément.

- Le nombre de masse,  $A=N+Z$ , est le nombre total de nucléons dans le noyau.  $N$  représente le nombre de neutrons présents dans le noyau. **Un noyau qui a un nombre donné de protons et de neutrons est un nuclide.**
- Le noyau a un diamètre faible (environ  $10^{-15}$  m). Il est constitué de particules appelées **nucléons**: les **protons** et les **neutrons** qui sont maintenus ensemble par des forces nucléaires.

- On note **Z** le nombre de proton  
**Z** est le nombre de charge
- On note A le nombre de nucléon  
**A** est le nombre de masse
- On note **N** le nombre de neutron
- Deux atomes ayant :
  - le même **Z** mais un **A** différent sont des isotopes
  - le même **A** mais un **Z** différent sont des isobares
  - le même **N** mais un **Z** différent sont des isotones
  - le même **Z** et le même **A** sont des isomères

## a) Nuclides isotopes

même nombre atomique  $Z$

nombre de masse  $A$  différent

exemples Isotopes  $^{12}_6\text{C}$   $^{16}_6\text{C}$   $^{14}_6\text{C}$

- Leurs propriétés chimiques sont similaires mais leurs propriétés nucléaires peuvent varier fortement et certains se désintègrent spontanément en émettant un rayonnement électromagnétique ( $\gamma$ ) ou des particules ( $\beta^-$  = électron,  $\beta^+$  = positron,  $\alpha = {}^4_2\text{He}$ ), **c'est le phénomène de radioactivité.**
- On utilise certains isotopes radioactifs comme marqueurs ou comme source de rayonnement en médecine et en biologie.

## b) Nuclides isobares

- Les noyaux d'atomes de différents éléments peuvent avoir le même nombre de nucléons  $A$ . On les appelle isobares.  
→ nombre atomique  $Z$  différent  
→ même nombre de masse  $A$
- Exemples      Isobares       ${}^{40}_{18}\text{Ar}$      ${}^{40}_{19}\text{K}$      ${}^{40}_{20}\text{Ca}$

### c) Nuclides isotones

- Les noyaux d'atomes de différents éléments peuvent avoir le même nombre de neutrons  $N$ . On les appelle isotones.
  - nombre atomique  $Z$  différent
  - nombre de masse  $A$  différent
- même nombre de neutrons  $N=A-Z$
- Exemples Isotones  ${}^{52}_{24}\text{Cr}$   ${}^{54}_{26}\text{Fe}$

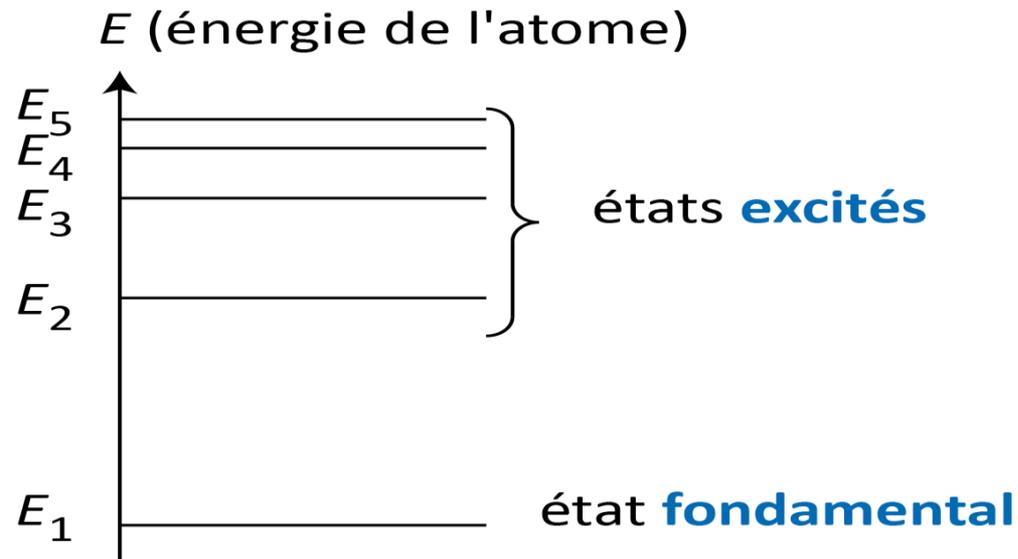
## d)Nuclides isomères

- Plusieurs nucléides peuvent avoir des noyaux atomiques de même numéro atomique  $Z$  et de même nombre de masse  $A$ , mais de structures nucléaires différentes (états énergétiques différents).
- On note les isomères nucléaires en adjoignant la lettre «*m*» pour « métastable » — à l'isotope considéré  
⇒ ex : le technétium  $99m$   $^{99m}\text{Tc}$

## e) Stabilité énergétique

### \* Niveau d'énergie

- L'énergie d'un atome est **quantifiée** : cela signifie qu'elle ne peut prendre que certaines valeurs discrètes (discontinues).
- Chaque valeur possible de l'énergie d'un atome s'appelle un niveau d'énergie.
- Lorsque l'atome se trouve dans l'état d'énergie la plus basse, il est dans son **état fondamental**. Sinon il est dans un état **excité**.



- Un même noyau peut donc être présent sous différents états énergétiques:
  - **état fondamental**  ${}^A_ZX$  : état énergétique minimal d'un atome
  - **états excités**,  ${}^A_ZX^*$  : très instables, durée vie très brève ( $10^{-12}$  s)
  - **états métastables**,  ${}^{Am}_ZX$  (instables, durée vie de  $10^{-12}$  s à quelque heures .

# La physique des rayonnements ionisants

## typologie des noyaux

**ISOTOPES**  $Z \equiv ; A \text{ et } N \neq$



**ISOBARES**  $A \equiv ; Z \text{ et } N \neq$



**ISOTONES**  $N \equiv ; Z \text{ et } A \neq$



**ISOMERES**  $A \text{ et } Z \equiv ; E \neq$  état excité  $\gamma \rightarrow$  état fondamental

## 1.5 Charge électrique de l'atome

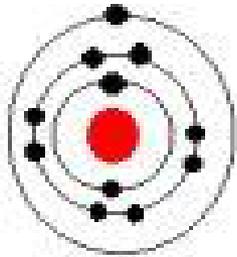
- **Au centre** : le noyau dans lequel on trouve les protons positifs et les neutrons dépourvus de charge électrique.
- **Autour du noyau tournent les électrons** portant une charge électrique négative.
- En valeur absolue, électrons et les protons portent la même charge égale à  $1,6 \times 10^{-19}$  C (Coulomb)
- Dans un atome, les protons et les électrons sont en nombres égaux. Cela explique que la matière soit électriquement neutre car les atomes qui la constituent portent une charge électrique nulle.

# Les ions

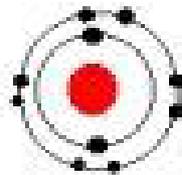
- L'atome peut perdre ou gagner un ou plusieurs électrons et peut alors être chargé positivement ou négativement.

Il est alors appelé ion.

Atome et ion sodium (Na)

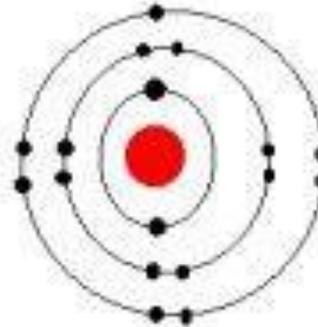


L'atome  
(11 électrons)

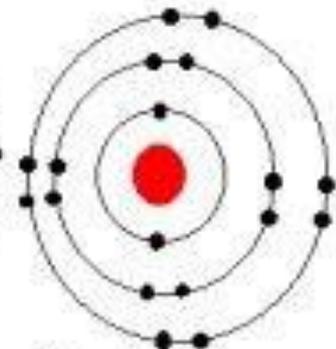


L'ion  
(10 électrons)

L'atome de chlore et l'ion chlorure

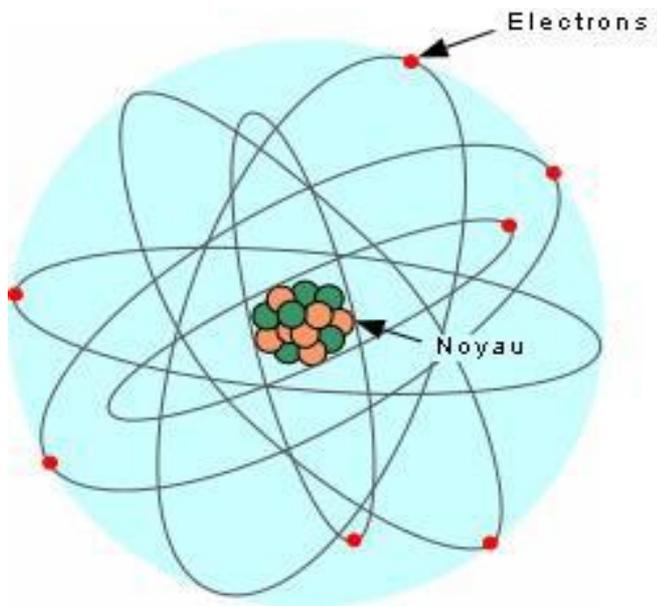


L'atome de chlore

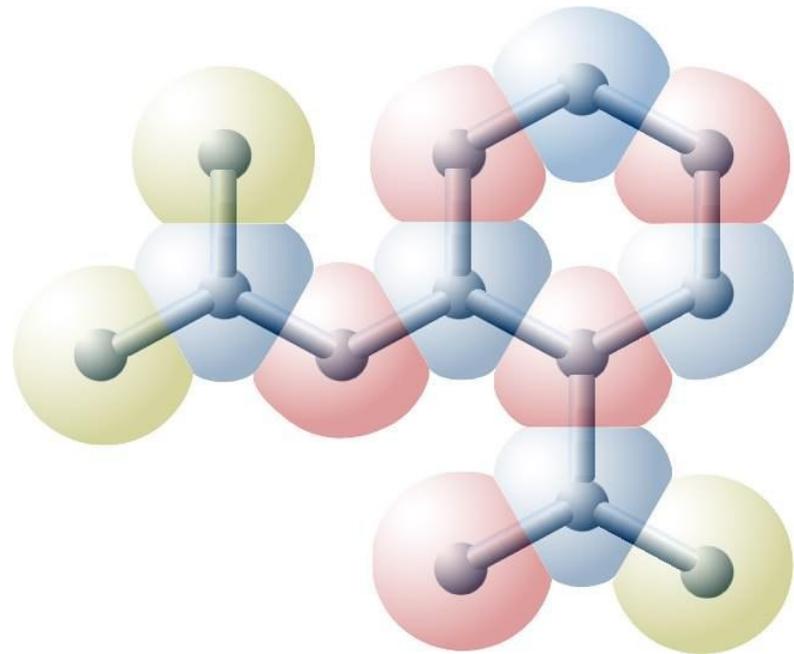


L'ion chlorure

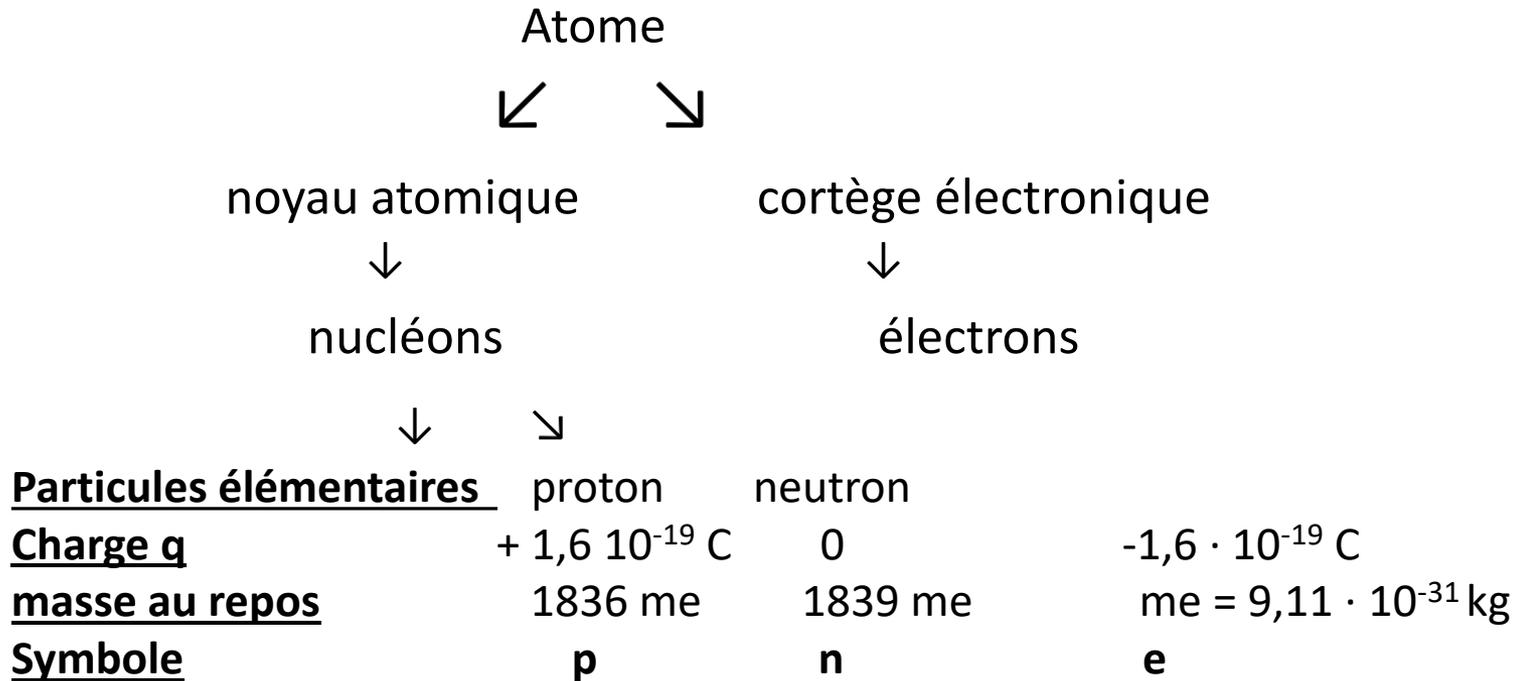
## Atome



## Molécule



# Tableau récapitulatif



A

Pour identifier un nuclide, on utilise la notation suivante :

X

Z

où X est le symbole chimique de l'élément en question.

## 1.6 la masse atomique

- La **masse atomique** correspond à la **masse** d'un atome. Cette **masse** peut se mesurer en grammes (g). Pour faciliter les calculs, on utilise **unité de masse atomique (u.m.a)**.
- La masse atomique représente la masse de tous les neutrons et des protons constituant son noyau. La masse des électrons n'est pas prise en compte, car les électrons sont environ 2 000 fois plus légers que les protons et les neutrons. Leur masse a donc très peu d'influence sur la masse totale de l'atome.
- Par convention: correspond au douzième de la masse atomique du carbone  $^{12}\text{C}$  ( $1 \text{ u.m.a} = 1/12 \times m_{\text{C}}$ ) =  $1,66 \times 10^{-24} \text{ g.} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg.}$

### Explication

- **la masse de l'atome neutre de l'isotope  $^{12}_6\text{C}$  du carbone est égale exactement à 12 uma** et 1 mole d'atomes de  $^{12}\text{C}$  a par définition une masse de 0,012 kg , elle contient  $6,022 \cdot 10^{23}$  atomes de carbone.

$$1 \text{ u} = \frac{M_{^{12}\text{C}}}{N_A} \times \frac{1}{12} = \frac{12,0000 \times 10^{-3}}{6,02214 \times 10^{23}} \times \frac{1}{12} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

## Exemples:

- Un atome de potassium 39 ( $^{39}\text{K}$ ) a une masse atomique de 39,0 u.m.a. Quelle est sa masse atomique en grammes?

Solution: **1 u.m.a** =  $1,66 \times 10^{-24}$  g

$$39 \text{ u.m.a} = ?$$

$$m_{\text{K}} \approx 6,47 \times 10^{-23} \text{ g.}$$

- Un atome d'azote a une masse atomique de  $2,32 \times 10^{-23}$  g. Quelle est sa masse atomique en unités de masse atomique u.m.a ?

Solution: **1 u.m.a** =  $1,66 \times 10^{-24}$  g

$$? = 2,32 \times 10^{-23} \text{ g}$$

$$m_{\text{N}} \approx 14 \text{ u.m.a.}$$

# Les masses des constituants de l'atome

$$m_p = 1,672\ 64 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_n = 1,675\ 0 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

# 1-7 Principes fondamentaux

- 1-7-1 Équivalence masse énergie

- **Relation masse énergie**

- Einstein établit l'équivalence entre masse et énergie sous la forme de la relation fondamentale de la relativité :  $E = mc^2$
- On en déduit la valeur en énergie (en eV) d'1 u.m.a.

$$1 \text{ u.m.a.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \times 9 \cdot 10^{16} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 9,33 \cdot 10^8 \text{ eV} = 931,5 \text{ MeV}$$

De la même manière, la masse au repos d'un électron correspond à 511 keV.

- **«Masse» du photon (au repos !)**

Des relations  $E = h \nu = hc / \lambda$  (énergie du photon) et  $E = m c^2$  (Einstein) on pourrait déduire :  $m = h / \lambda c$

- Mais il faut remarquer qu'une particule qui se déplace à la vitesse de la lumière ne satisfait pas aux relations de la mécanique classique, et que, par ailleurs, le photon au repos n'existe pas.

## Valeurs des masses des particules élémentaires en u.m.a et en MeV

masse en	uma	MeV
e-	$5,485 \cdot 10^{-4}$	0,511
p+	1,00727	938,28
n0	1,00866	939,57
uma	1	931,5
$\alpha$	4,00150	3727,41

- 1-7-2 Conservation de la charge

Dans toute transformation radioactive ou d'une réaction nucléaire, le nombre de charge se conserve.

- 1-7-3 Conservation du nombre de nucléon

Dans toute transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de masse, donc du nombre de nucléon.

- 1-7-4 Conservation de l'énergie

L'énergie existe sous diverses formes :

- énergie cinétique (  $\frac{1}{2} mv^2$  )
- énergie potentielle ( $E_k, E_l \dots$ )
- énergie rayonnante ( $h\nu$ )

- 1-7-5 Conservation de l'impulsion

Une particule en mouvement a une impulsion ou quantité de mouvement :

$$p = mv$$

- Au cours de l'interaction, l'impulsion totale du système est conservée.

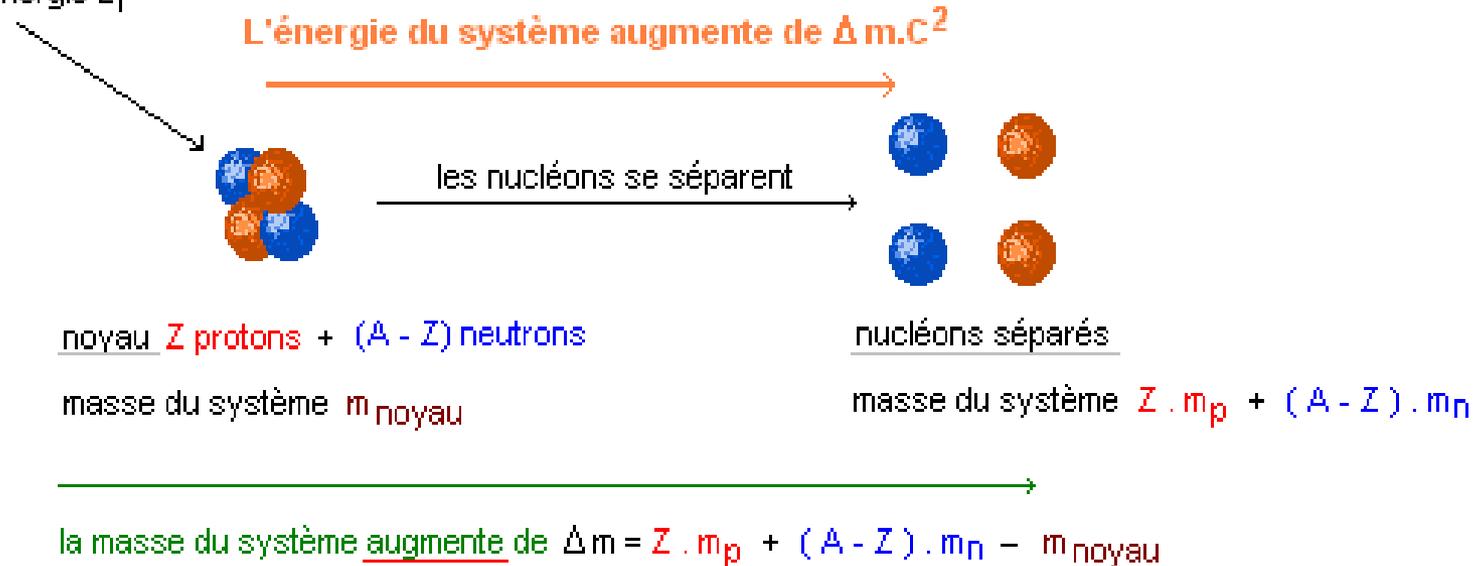
## 1-8 l'énergie de liaison

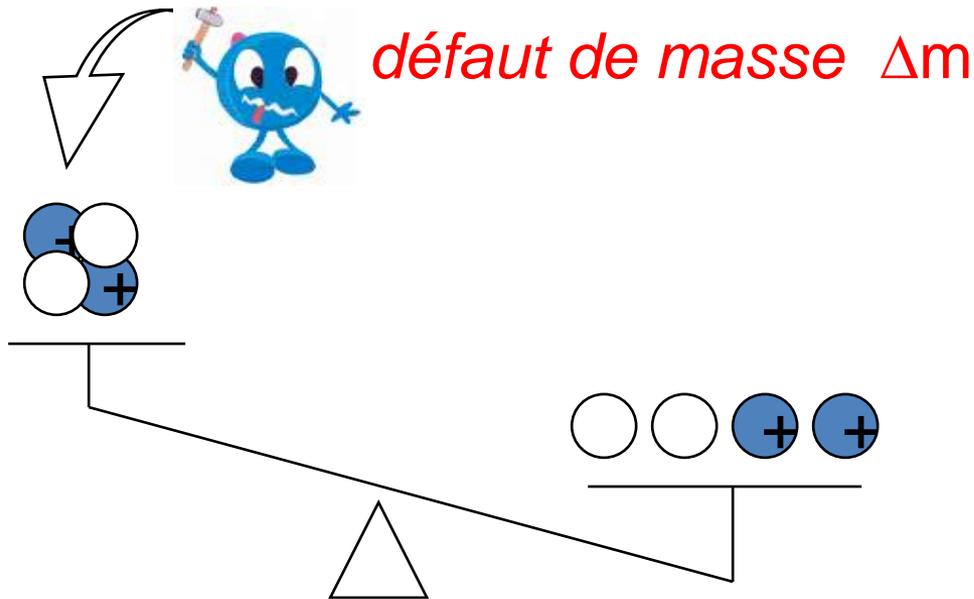
- L'existence d'un noyau stable signifie que les nucléons sont dans un état lié.
- Puisque les protons dans un noyau sont soumis à une forte répulsion électrique, il doit exister une attraction encore plus forte qui les maintient ensemble et assure la cohésion du noyau = force nucléaire.
- **La force nucléaire** est une interaction à courte portée, alors que l'interaction électromagnétique est une interaction à longue portée.
- La force nucléaire a la caractéristique importante d'être essentiellement la même pour tous les nucléons, quelle que soit leur charge.

## a) Energie de liaison totale (défaut de masse)

- $M(A,Z) < Zm_p + Nm_n$
- $Zm_p + Nm_n - M(A,Z) = \Delta M \cdot c^2 = EL$
- **Energie de liaison = Energie nécessaire pour dissocier les nucléons**

on fournit au noyau  
l'énergie  $E_1$





Qui selon  $\Delta E = \Delta m c^2$

correspond à

*l'énergie de liaison des nucléons*

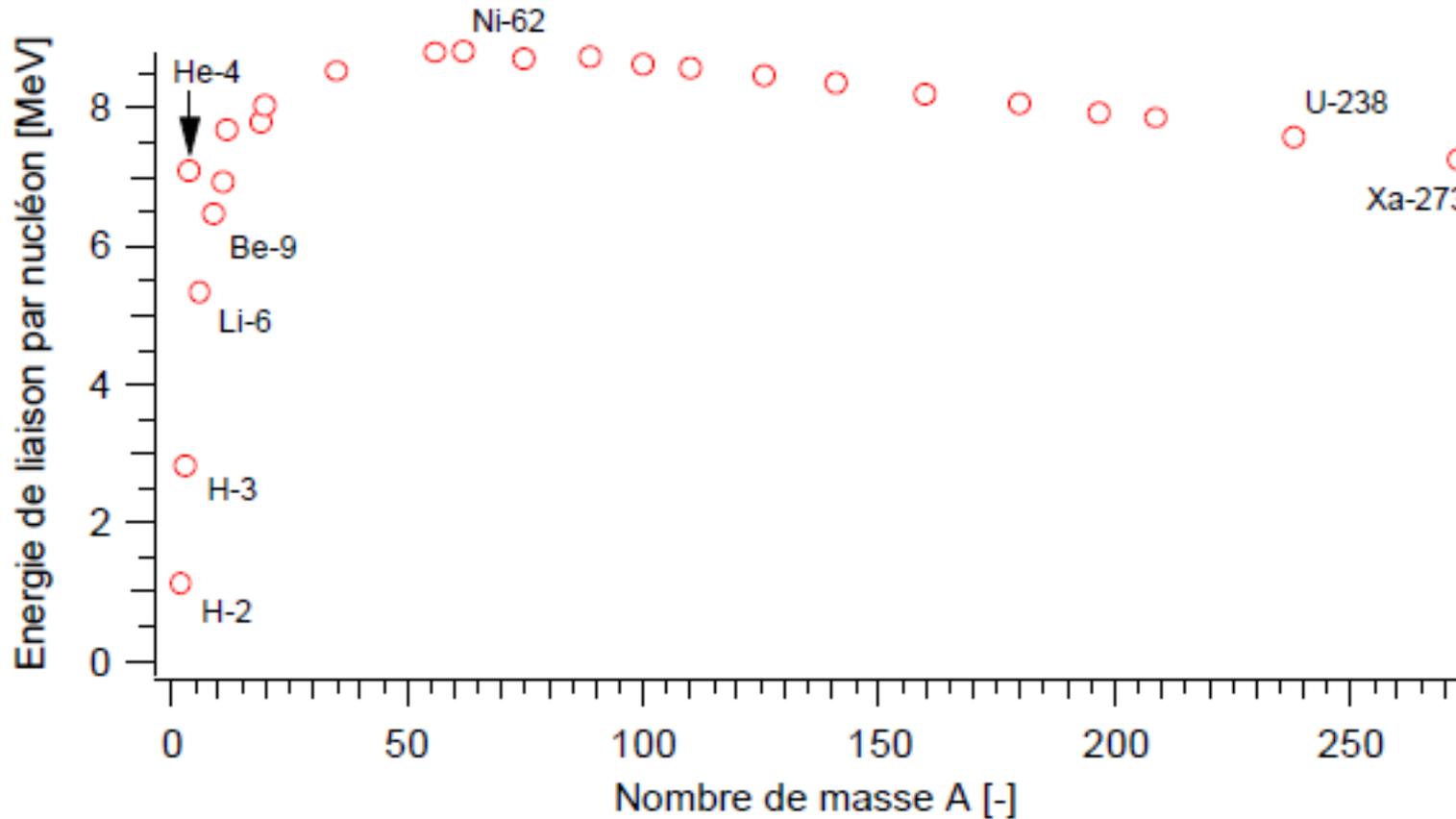
## b) Energie de liaison par nucléon

- Résultante complexe de forces

$$E_A = E_L/A$$

- Permet de comparer la stabilité des noyaux.
- Les noyaux dont l'énergie de liaison par nucléon est la plus grande sont les plus stables.

# Courbe d'Aston



On remarque que l'énergie de liaison accuse un maximum pour les valeurs de A situées aux environs de 60.

## ENONCE :

- 1- Préciser la composition d'un noyau de l'isotope 235 de l'uranium ayant pour symbole  ${}^{235}_{92}\text{U}$
- 2- Calculer le défaut de masse de ce noyau, en unité de masse atomique puis en kilogramme.

Masse du noyau d'uranium 235 :  $m({}^{235}_{92}\text{U}) = 234,99332 \text{ u}$

Masse du neutron  $m_n = 1,00866 \text{ u}$

Masse du proton  $m_p = 1,00728 \text{ u}$

$1 \text{ u} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$

- 3- Calculer, en joule puis en MeV, l'énergie de liaison de ce noyau.

$1 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ J}$

$c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$

- 4- Calculer l'énergie de liaison par nucléon de ce noyau.

## SOLUTION :

- 1- Précisons la composition d'un noyau de l'isotope 235 de l'uranium ayant pour symbole  ${}^{235}_{92}\text{U}$ .

Le noyau de  ${}^{235}_{92}\text{U}$  contient :  $A = 235$  nucléons, soit  $Z = 92$  protons et  $N = A - Z = 235 - 92 = 143$  neutrons

- 2- Calculons le défaut de masse de ce noyau, en unité de masse atomique puis en kilogramme.

**Définition :** On appelle défaut de masse d'un noyau la différence entre la masse totale des  $A$  nucléons séparés ( $Z$  protons et  $N$  neutrons), au repos et la masse du noyau formé, au repos.

Ici, on écrit :

$$\Delta m = (92 m_p + 143 m_n) - m({}^{235}_{92}\text{U})$$

$$\Delta m = (92 \times 1,00728 + 143 \times 1,00866) - 234,99332 \quad \rightarrow \quad \Delta m = 236,90814 - 234,99332 = 1,91482 \text{ u}$$

L'énoncé donne  $1 \text{ u} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$   $\rightarrow \Delta m = 1,91482 \cdot (1,66054 \times 10^{-27}) = 3,17964 \times 10^{-27} \text{ kg}$

- 3- Calculons, en joule puis en MeV, l'énergie de liaison de ce noyau  ${}^{235}_{92}\text{U}$ .

**Définition :** L'énergie de liaison  $E_L$  du noyau  ${}^A_Z\text{X}$  est l'énergie qu'il faut fournir à ce noyau au repos pour le dissocier en ses  $A$  nucléons isolés, également au repos :

$$E_L + m({}^A_Z\text{X}) \times c^2 = m(A \text{ nucléons séparés}) \times c^2, \quad E_L = m(A \text{ nucléons séparés}) \times c^2 - m({}^A_Z\text{X}) \times c^2$$

$$E_L = \Delta m \times c^2$$

$$E_L = 3,17964 \times 10^{-27} \times (2,9979 \times 10^8)^2 = 2,85767 \times 10^{-10} \text{ J} \quad \rightarrow \quad E_L = 2,85767 \times 10^{-10} \text{ J}$$

L'énoncé donne  $1 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ J}$ , soit  $1 \text{ J} = 6,2414 \times 10^{18} \text{ eV}$

$$E_L = 2,85767 \times 10^{-10} \times 6,2414 \times 10^{18} = 1,7836 \times 10^9 \text{ eV} \quad \rightarrow \quad E_L = 1783,6 \text{ MeV}$$

- 4- Calculons l'énergie de liaison par nucléon de ce noyau. On trouve :  $E_L / A = 1783,6 / 235 = 7,5897 \text{ MeV par nucléon}$

# 1.9 les 4 forces

24 <b>Cr</b> 52,00	25 <b>Mn</b> 54,94	26 <b>Fe</b> 55,85
42 <b>Mo</b> 95,96	43 <b>Tc</b> [98]	44 <b>Ru</b> 101,07
74 <b>W</b> 183,84	75 <b>Re</b> 186,21	76 <b>Os</b> 190,23
106 <b>Sg</b> [271]	107 <b>Bh</b> [272]	108 <b>Hs</b> [277]

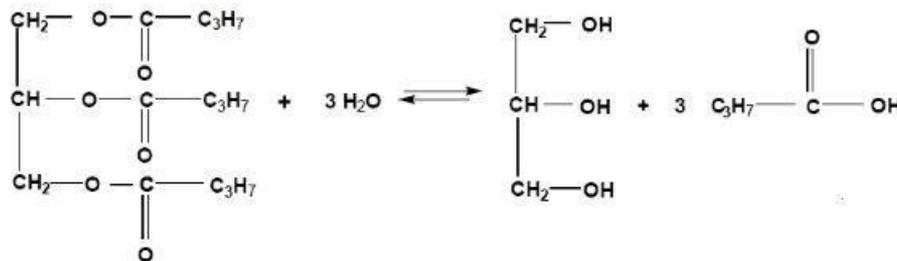
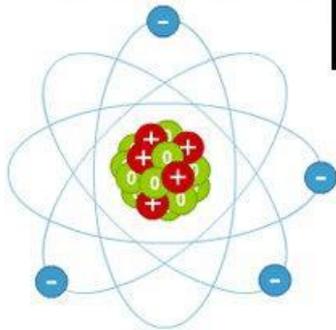


-entre les planètes

-entre les particules chargées

-qui régit les atomes

-qui régit les particules des noyaux



- Dans la nature, les objets sont soumis à toutes sortes de forces qui s'exercent à distance.
- Par exemple, deux masses s'attirent, deux charges électriques s'attirent ou se repoussent suivant leur signe.
- Forces d'interaction (ou plus simplement interactions) de 4 types fondamentaux : l'interaction forte, l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et la gravitation.

# 1.L'interaction forte

- **Assure la cohésion du noyau en faisant fortement s'attirer les nucléons**
  - Distances très courtes, quelques diamètres de noyaux.
  - A distance égale, 100 à 1000 fois plus intense que l'interaction électromagnétique.

## 2. L'interaction électromagnétique

- **Deux formes, la force électrique et la force magnétique**
- A l'origine de la répulsion de deux charges électriques de même signe (deux protons, par exemple), et s'attirer deux charges de signes opposés (un électron et un noyau).
- Porte à l'infini mais elle est 4 fois plus faible à distance double (*loi de "l'inverse carré de la distance"*).
- **Responsable de l'existence des atomes et de leurs propriétés chimiques.**

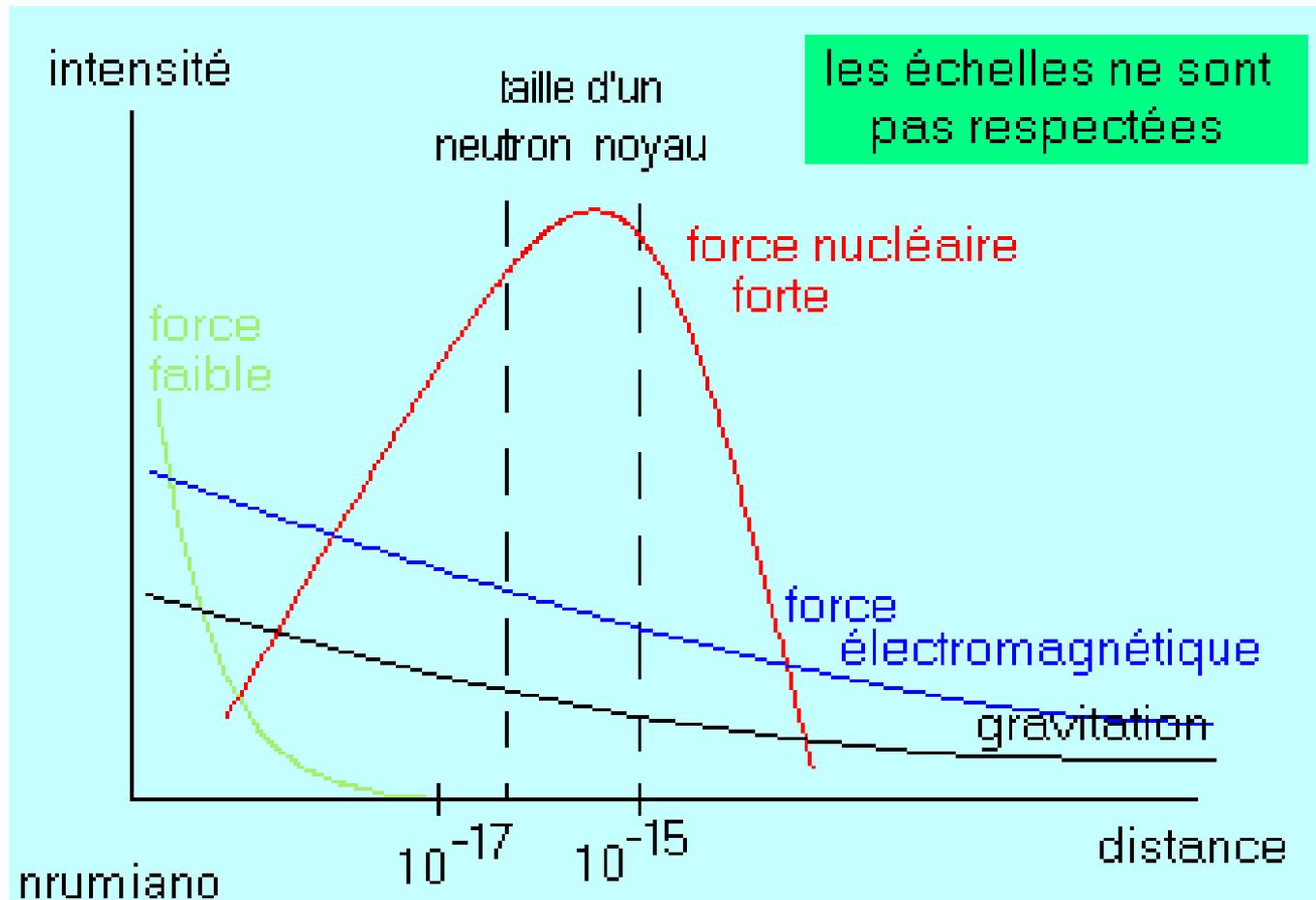
### 3. L'interaction faible

- Interaction faible, ou force nucléaire faible
- Responsable de phénomènes comme la *radioactivité*
- Portée extrêmement faible, de l'ordre de quelques centièmes de la taille d'un nucléon.
- Cent mille fois plus faible que l'interaction forte.

## 4. La gravitation

- **Responsable de l'attraction des masses, de la pesanteur, du mouvement des corps célestes.**
- Varie avec la distance suivant la même loi que la force électromagnétique.
- La plus faible des quatre.
- Celle que nous ressentons le plus (masse de la Terre gigantesque)

# Les 4 forces



# II) La Radioactivité

## 1. Introduction

On dénombre actuellement 90 éléments naturels, 16 éléments artificiels.

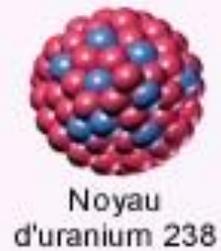
## 2. La nucléo-synthèse

Tous les éléments naturels ont été fabriqués par des évènements cosmiques, le plus souvent catastrophiques « théorie du Big Bang ».

### 3. Stabilité et instabilité nucléaire

- Un noyau atomique est radioactif lorsqu'il change spontanément d'état énergétique au cours du temps.
- Cette transformation, qui correspond à un changement de nature du noyau, se fait par :
  - ❑ émission de **rayonnements « primaires »** :
    - particules ( $\alpha$  ou  $\beta$ )
    - rayonnement ( $\gamma$ )
  - ❑ **capture électronique**
  - ❑ **fission spontanée**

### Emission ALPHA



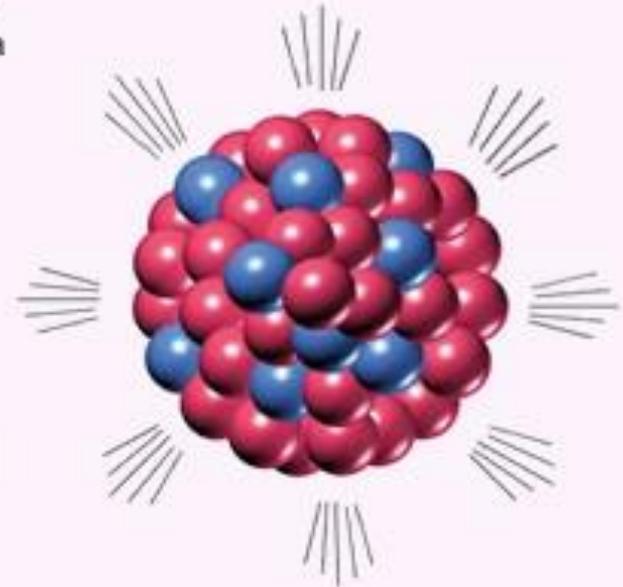
Noyau d'hélium  
ou particule alpha

### Emission BETA



Electron

### Emission GAMMA

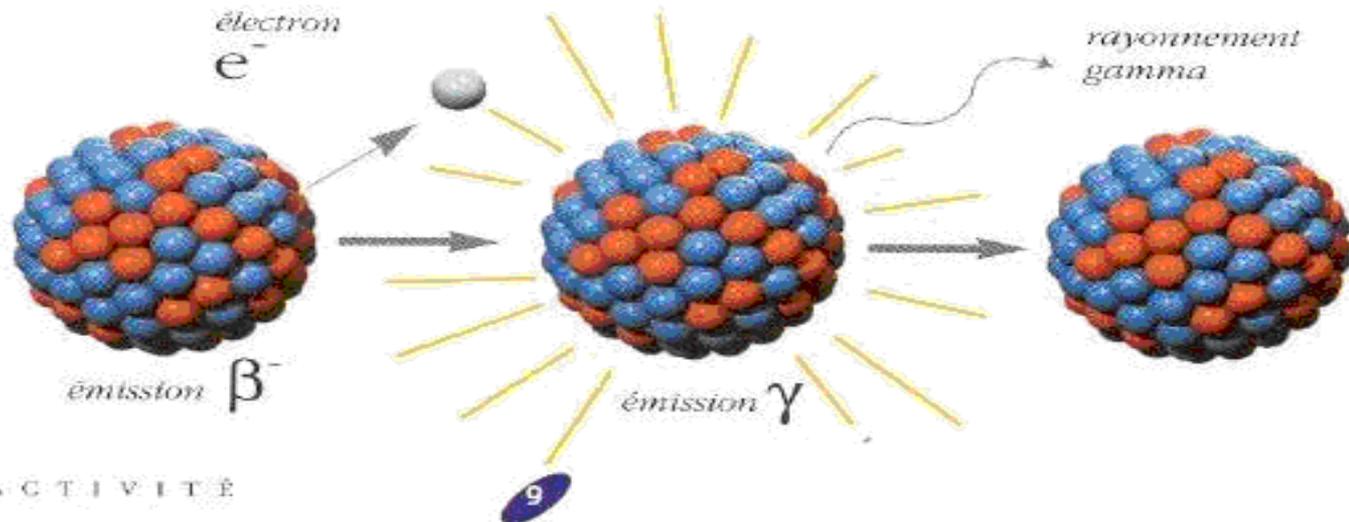


## 3.1 Caractéristiques des transformations radioactives

- elles sont **spontanées** : elles se produisent sans aucune intervention.
- elles sont **aléatoires** : il est impossible de prévoir quand un noyau va se désintégrer.
- elles sont **inéluçtables** : rien ne peut les empêcher.
- elles sont **indépendantes des paramètres** ( pression, température...) qui peuvent agir sur les transformations chimiques ou physiques.
- elles sont **exoénergétiques**

# La nature des particules émises

- **Radioactivité  $\alpha$**  : les particules émises sont des **noyaux d'hélium He** (4 nucléons), en général peu rapides (20 000 km/s ) et peu pénétrants.
- **Radioactivité  $\beta$  moins** : les particules émises sont des **électrons**, légers, rapides (200 000 km/s ) et pénétrants.
- **Radioactivité  $\beta$  plus** (radioactivité artificielle) : les particules émises sont des électrons positifs ou **positons** (ou anti-électrons ).
- **Radioactivité  $\gamma$**  : les particules émises sont des **photons** de grande énergie (ou des ondes électromagnétiques de très courte longueur d'onde) , vitesse: 300 000 km/s, très pénétrants.



## 3.2. Conditions de stabilité du noyau

### ➤ a) La parité

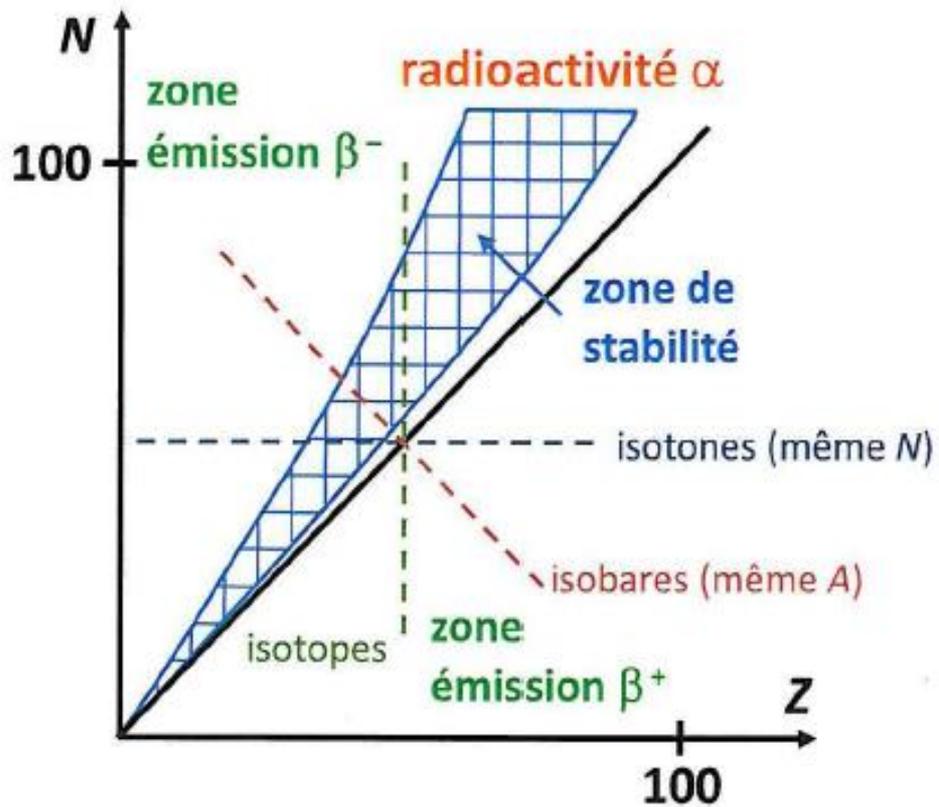
- Noyaux pairs-pairs (N et Z sont pairs) : environ 82% des noyaux stables.
- Noyaux pairs-impairs (N pair, Z impair ou N impair, Z pair) : environ 13%.
- Noyaux impairs-impairs (N et Z impairs) : seulement 5 %.

### ➤ b) Énergie de liaison par nucléon

- L'énergie de liaison par nucléon est d'autant plus grande que le noyau est stable.

- c) Répartition des noyaux en fonction de N et de Z (rapport neutrons/protons) *Vallée de stabilité*
- La force électromagnétique (proportionnelle à  $Z$ ) tend à faire éclater le noyau, alors que, dans certaines limites, la force nucléaire forte (proportionnelle à  $N$ ) augmente la cohésion du noyau.
  - Ainsi, plus les noyaux deviennent lourds et plus le nombre de neutrons augmente par rapport au nombre de protons, pour compenser les forces de répulsions électromagnétiques entre les protons.

## Vallée de stabilité



- La courbe de la stabilité correspond à l'ensemble des noyaux stables ; on constate que :
  - **Pour  $Z < 20$** , ces noyaux stables se situent sur la bissectrice  $N = Z$  (noyaux comportant autant de neutrons que de protons)
  - **Pour  $Z > 20$** , les noyaux stables se situent au-dessus de  $N = Z$
  - **Pour les noyaux instables :**
    - si le noyau est situé au-dessus de la Vallée de la stabilité : radioactivité  $\beta^-$
    - si le noyau est situé en-dessous de la Vallée de la stabilité : radioactivité  $\beta^+$
    - certains noyaux lourds  $A > 170$  se désintègrent spontanément en émettant une particule  $\alpha$ .

## 4. Bilan d'énergie de masse

- D'où vient l'énergie libérée lors des transformations nucléaires ?  
Lors d'une réaction nucléaire spontanée, la masse des particules dans l'état initial est supérieure à la masse des produits de désintégration.

### Exemples :

- désintégration alpha :  ${}_{84}^{212}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{208}\text{Pb} + \alpha$  avec  $m_{\text{Po}} > m_{\text{Pb}} + m_{\alpha}$
- désintégration  $\beta^-$  :  ${}_{27}^{60}\text{Co} \rightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + e^- + \nu$  avec  $m_{\text{Co}} > m_{\text{Ni}} + m_{e^-}$
- fission spontanée :  ${}_{98}^{252}\text{Cf} \rightarrow {}_{56}^{146}\text{Ba} + {}_{42}^{106}\text{Mo}$  avec  $m_{\text{Cf}} > m_{\text{Ba}} + m_{\text{Mo}}$

On observe une différence de masse entre  $m_i$  (masse de la particule dans l'état initial) et  $m_f$  (somme des masses des particules dans l'état final) :  $\Delta m = m_i - m_f$ .

On appelle bilan d'énergie de masse de la désintégration la quantité  $Q$  définie par :

$$Q = \Delta m \times c^2 = (m_i - m_f) \times c^2$$

C'est cette transformation de l'énergie de masse en énergie cinétique et / ou d'excitation qui est communiquée aux produits de désintégration.

## 5. Désintégrations radioactives

- Le retour à la stabilité s'effectue par des désintégrations alpha, bêta, capture électronique ou encore par émission gamma

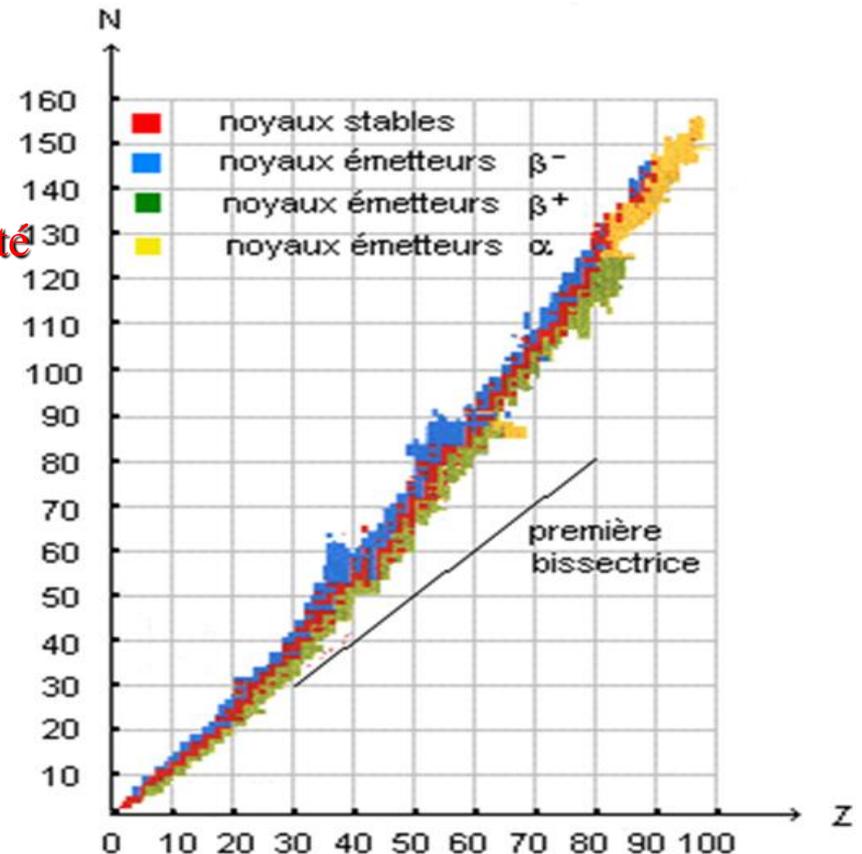
- Nucléide au dessus de la Vallée de stabilité (VdS)

Émission d'un électron,  
c'est la radioactivité  $\beta^-$

- Nucléide au dessous de la VdS

Émission d'un positon,  
C'est la radioactivité  $\beta^+$

OU émission d'une particule  $\alpha$   
(occasionnellement)



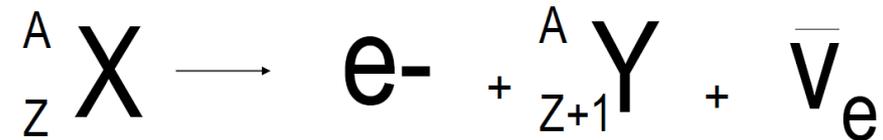
- **5.1 Transformation isobarique:** « A est constant »

- 3 types:

- Radioactivité  $\beta^-$
- Radioactivité  $\beta^+$
- Capture électronique

## a. Désintégration $\beta^-$ - (Noyaux riches en neutrons)

- Le noyau expulse un électron, c'est-à-dire qu'un neutron se transforme en proton, et l'émission de l'électron s'accompagne de l'émission d'un anti-neutrino (particule de masse nulle et électriquement neutre). La réaction s'écrit :

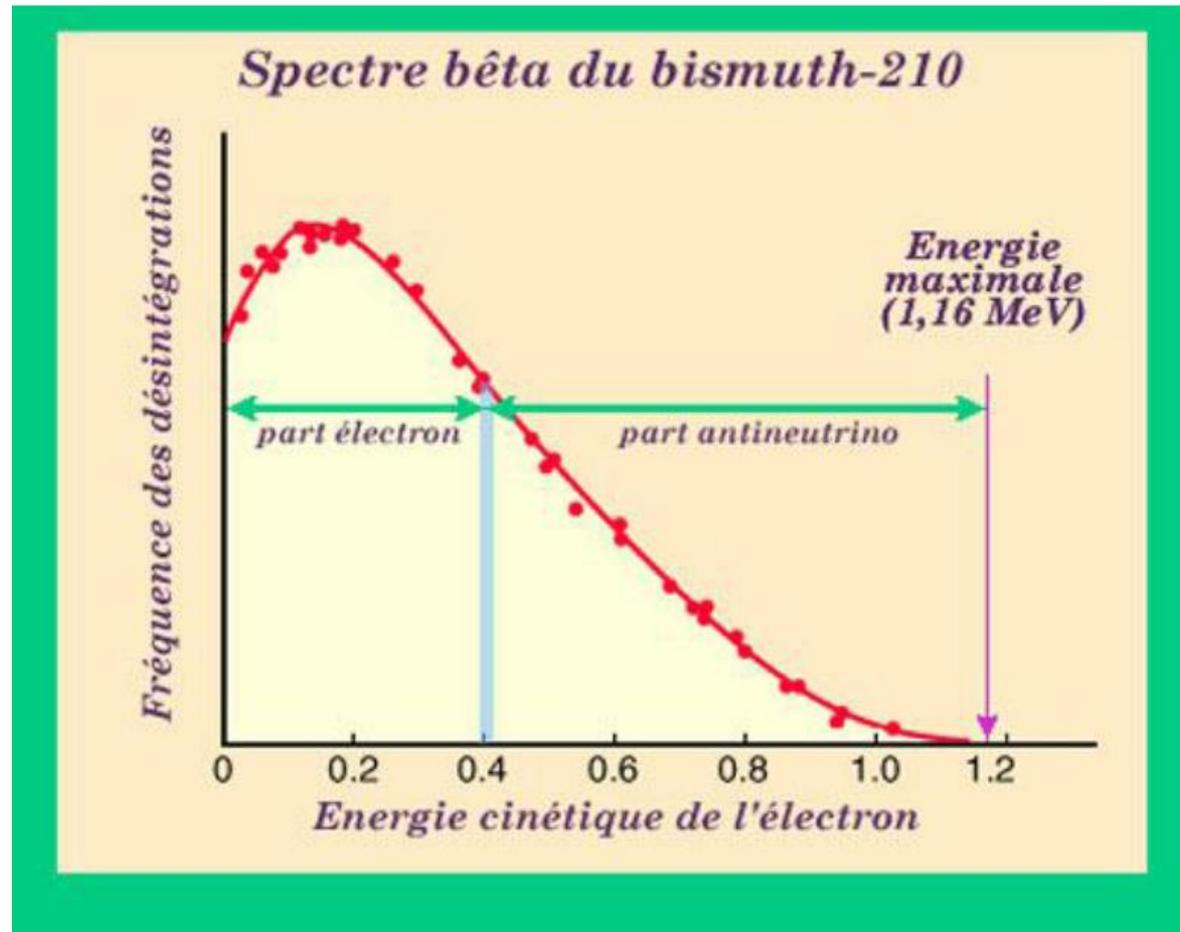


### Condition d'émission de la radioactivité $\beta^-$

- la réaction  $\beta^-$  n'a lieu que si la différence de masse entre atome-père et atome-fils  $> 0$

Le spectre d'énergie (nombre de particules émises en fonction de leur énergie cinétique) des  $\beta^-$  (électrons) est continu en raison du partage de manière aléatoire de l'énergie  $E$  de la réaction entre les particules  $\beta^-$  et  $\bar{\nu}$

**spectre d'émission continu** : il s'étend de 0 quand  $\bar{\nu}$  emporte toute l'énergie, jusqu'à  $E$  quand  $\bar{\nu}$  n'emporte aucune énergie



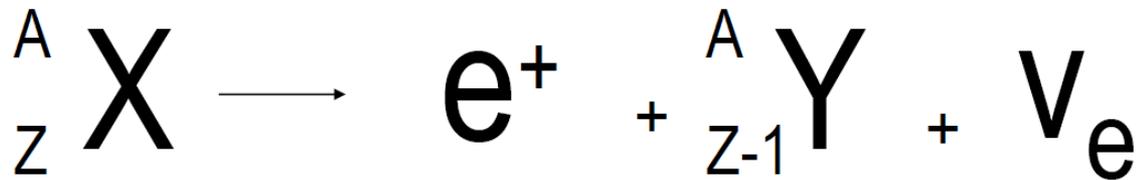
- Le rayonnement  $\beta^-$  est moyennement pénétrant, arrêté par une feuille d'aluminium de quelques mm d'épaisseur
- Son pouvoir d'ionisation est moyen.
- Applications médicales des  $\beta^-$  : Exemple: traitement du cancer de la thyroïde par radiothérapie métabolique (Iode 131)
- Le But est de provoquer la **mort cellulaire** des tissus pathologiques **par irradiation**, de manière ciblée.

*Iode-131 : - émetteur  $\beta^-$  mais aussi émetteur gamma (  $T =$  de 8,12 jours)*

## ***b. Désintégration $\beta^+$ et capture électronique (CE)***

(Noyaux riches en protons)

- **Le noyau expulse un positron** (particule de charge  $+e$  et de même masse que l'électron). Un proton du noyau se transforme en neutron et l'émission du positron s'accompagne de l'émission d'un neutrino (particule de masse nulle et électriquement neutre). La transformation s'écrit :

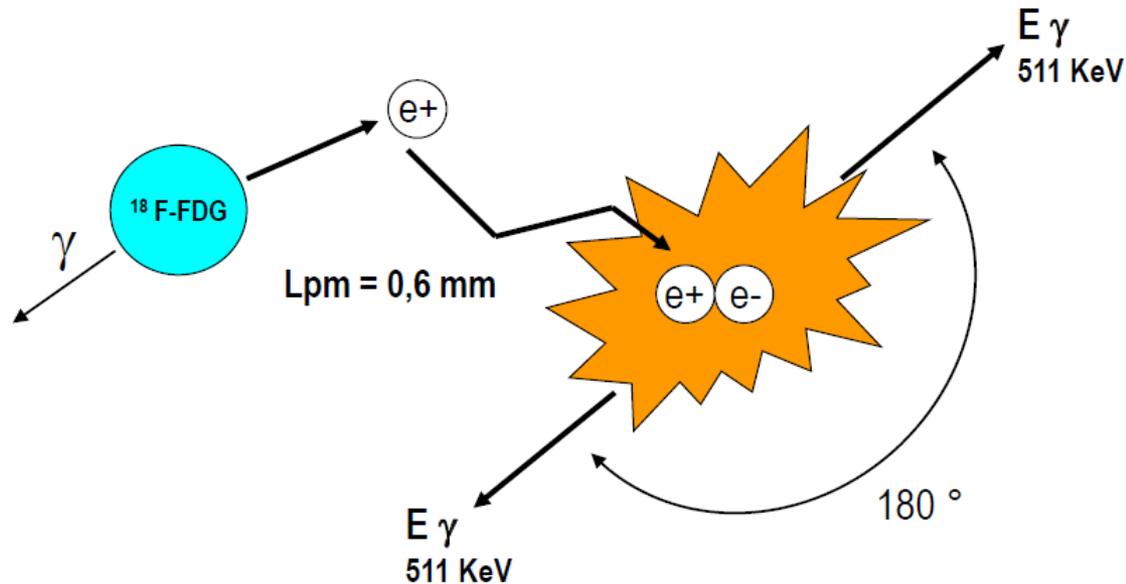


**Condition d'émission de la radioactivité  $\beta^+$**

*la réaction  $\beta^+$  n'a lieu que si la différence de masse entre atome-père et atome-fils  $> 2 \cdot m(e^-)$   
la réaction  $\beta^+$  n'a lieu que si la différence énergétique entre atome-père et atome-fils  $> 1,022 \text{ MeV}$*

Le positon émis entre en contact avec les électrons du milieu extérieur : il **s'annihile** avec un électron :  ${}_{+1}^0e + {}_{-1}^0e \rightarrow 2\gamma$   
 $\Rightarrow$  la matière disparaît, au profit de deux  $\gamma$  : énergie de 0,511 MeV chacun et émis à  $180^\circ$  l'un de l'autre  $\Rightarrow$  la **double émission  $\gamma$**  est caractéristique du  $\beta^+$

## Réaction d'annihilation



La radioactivité  $\beta^+$  ne concerne que les noyaux artificiels, ce sont des particules à durée de vie très courte.

Ainsi que le rayonnement  $\beta^-$ , le rayonnement  $\beta^+$  est moyennement pénétrant, arrêté par une feuille d'aluminium de quelques mm d'épaisseur.

Son pouvoir d'ionisation est moyen.

**Applications médicales des  $\beta^+$**  : L'imagerie d'émission avec la réalisation d'images diagnostiques grâce à l'injection d'un radio traceur et une gamma caméra adaptée

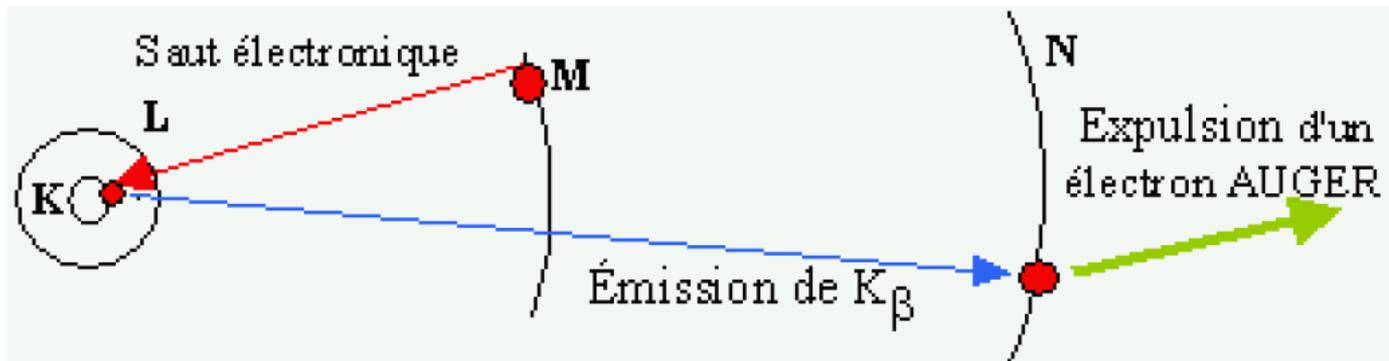
Exemple **La Tomographie par Émission de Positons (TEP)** au fluorodéoxyglucose marqué au fluor-18 ( $^{18}\text{F}$ FDG) pour le diagnostic du cancer

Le spectre d'énergie (nombre de particules émises en fonction de leur énergie cinétique) des  $\beta^+$  est aussi continu.

- **Si la condition  $\Delta M. c^2 > 1,02 \text{ MeV}$  n'est pas respectée**, la CE peut éventuellement avoir lieu (en compétition avec la désintégration  $\beta^+$ ) dans lequel un  $e^-$  du cortège électronique entourant le noyau (en général, un  $e^-$  proche du noyau) est capturé par celui-ci .
- un proton du noyau réagit alors avec cet électron, transmutant celui-ci en un neutron.
- Cette capture, tout comme le processus de désintégration  $\beta^+$ , conduit à la transformation d'un proton du noyau en neutron. La capture s'écrit :

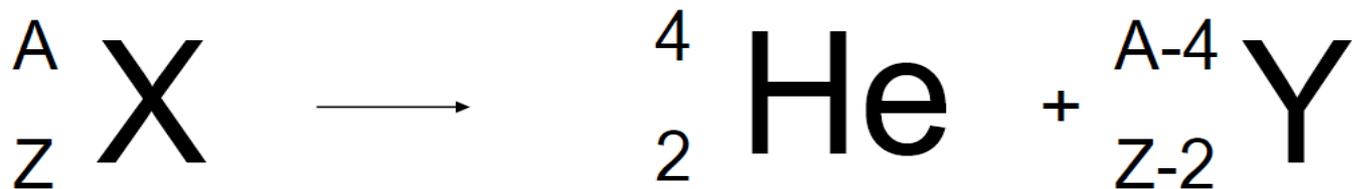


- la vacance laissée par l'électron provoque un réarrangement de tout le cortège électronique
- $\Rightarrow$  ***effet-Auger et émission de photons de fluorescence***



## 5.2. Désintégration alpha $\alpha$ (noyaux lourds)

- La masse totale du noyau fils et de la particule alpha est légèrement inférieure à la masse du noyau père , une partie de la masse étant convertie en énergie cinétique permettant l'expulsion du noyau d'hélium .
- Le Noyau fils peut être stable ou radioactif



- Pouvoir de pénétration faible : ce sont des particules facilement arrêtées par quelques cm d'air ou une feuille de papier.
- Du fait de leur taille et de leur double charge positive, le rayonnement  $\alpha$  est le plus ionisant.
- Pas d'application médicale de la radioactivité  $\alpha$

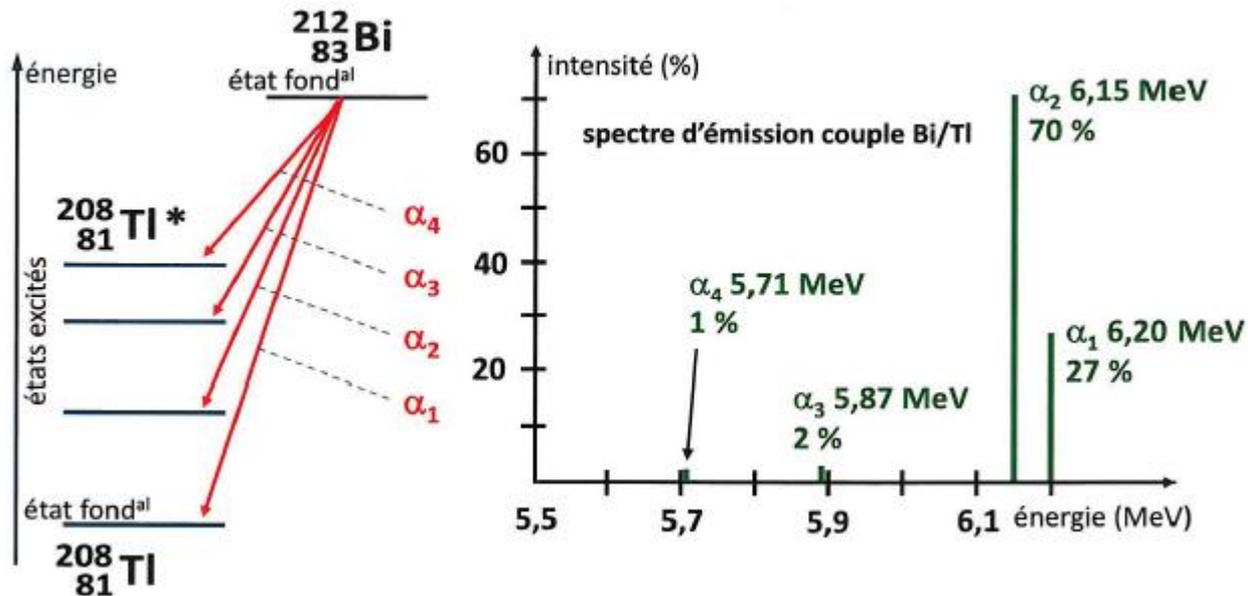
## Condition d'émission de la radioactivité $\alpha$ :

*la réaction  $\alpha$  n'a lieu que si la différence de masse entre atome-père et atomes-fils  $> 0$*

*la réaction  $\alpha$  n'a lieu que si la différence énergétique entre atome-père et atomes-fils  $> 0$*

- L'énergie des particules  $\alpha$  est quantifiée : **spectre de raies**

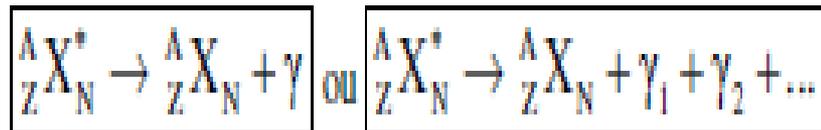
*couple Bismuth / Thallium*



## 5.3. Désintégration gamma

Au même titre que les atomes, les noyaux peuvent se trouver dans un état excité. La désexcitation d'un noyau  ${}^A_Z X_N^*$  vers son état fondamental  ${}^A_Z X_N$  se fait de deux manières :

- par émission gamma ( $\gamma$ ),
  - par transition directe si l'énergie du photon  $\gamma$  émis est égale à l'énergie d'excitation du noyau,
  - par cascade de rayonnements  $\gamma$  dont la somme des énergies est égale à l'énergie d'excitation.



- par conversion interne, c'est-à-dire un transfert direct de l'énergie d'excitation à un électron du cortège électronique.

- Le rayonnement  $\gamma$  est très pénétrant, il faut une forte épaisseur de béton (plusieurs mètres) ou de plomb (quelques cm) pour s'en protéger.
- Bien qu'il soit moins ionisant que les rayonnements  $\beta$ , son très fort pouvoir de pénétration le rend particulièrement dangereux pour les organismes vivants.
- L'énergie des particules Gamma est quantifiée  $\implies$  spectre de raies caractéristiques de l'élément radioactif.

# Applications médicales des rayonnements gamma

## → Diagnostic in vivo

⇒ Application : scintigraphie par  $\gamma$  - caméra

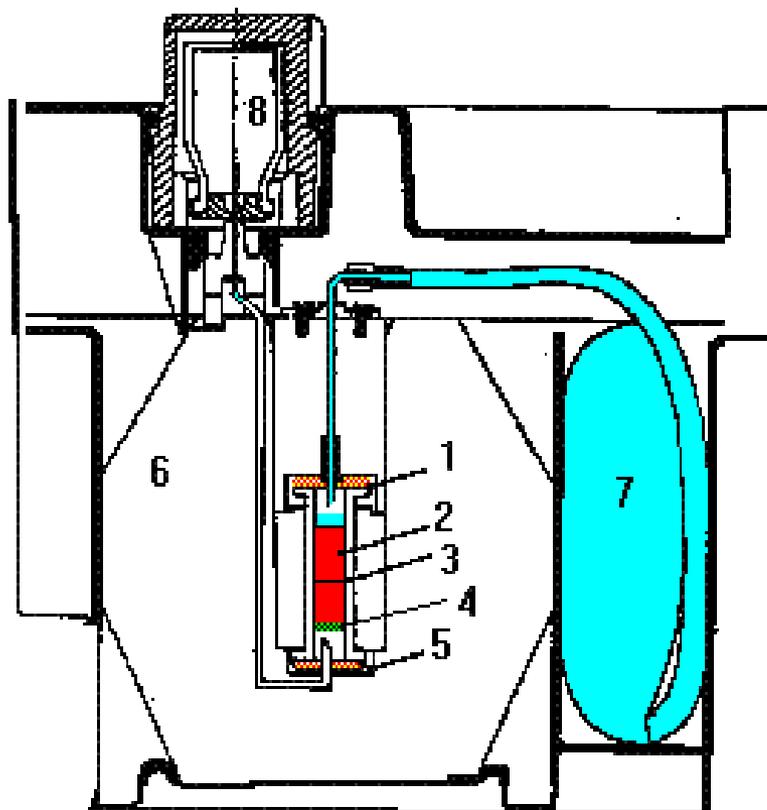
La médecine nucléaire utilise des isotopes radioactifs pour l'exploration de l'organisme humain. La scintigraphie consiste à injecter (le plus souvent par voie veineuse) un isotope radioactif (le traceur) qui se fixe dans la partie à explorer et émet un rayonnement gamma à l'extérieur que l'on peut détecter grâce à une caméra à scintillation

⇒ la  $\gamma$  - caméra permet ainsi la localisation spatiale des photons émis par l'organe cible  
Les isotopes utilisés sont l'iode  $^{131}\text{I}$  pour l'exploration fonctionnelle de la thyroïde et surtout le technétium  $^{99}\text{Tc}$  dont l'intérêt est sa courte période ( $T = 6,02\text{ h}$ ), ce qui minimise les équivalents de dose administrée.



- Le technétium 99m, livré dans les services de médecine nucléaire sous forme d'un générateur « **Générateur Molybdène-Technétium** », est de loin le radionucléide le plus employé.
- Sa courte période radioactive(6 heures) et la faible énergie de son rayonnement gamma permettent d'optimiser la dose reçue par le patient.
- L'activité administrée à un patient pour un examen est de l'ordre de quelques centaines de mégabecquerels (MBq).

# Principe Générateur Molybdène-Téchnétium



**1 : capuchons métalliques, 2 : colonne d'alumine, 3 : colonne chromatographique en verre, 4 : filtre, 5 : double aiguille, 6 : blindage en plomb, 7 : poche contenant l'éluant (Solution 0,9% NaCl et 0,005% de nitrate de sodium), 8 : flacon.**

## → Diagnostic in vitro

- Il s'agit d'une technique d'analyse de biologie médicale sans administration de radionucléides aux patients – permettant de doser certains composés contenus dans les fluides biologiques et notamment le sang préalablement prélevés sur le patient : **hormones, médicaments, marqueurs tumoraux, etc.**
- Cette technique met en œuvre des méthodes de dosage fondées sur les réactions immunologiques (réactions anticorps – antigènes marqués à l'iode<sup>125</sup>), d'où le nom de radio-immunologie ou RIA

- **Conversion interne (CI)** : dans certains cas, le photon émis lors de la **désexcitation** communique son énergie à un électron du cortège électronique, qui est expulsé  $\Rightarrow$  il s'ensuit un **réarrangement du cortège électronique pour combler la lacune de l'électron éjecté** (*émission de photons de fluorescence (photons X) ou d'un électron Auger*)
- $\Rightarrow$  spectre à **la fois continu et de raies d'énergie.**

*NB : ne pas confondre CI (transfert interne d'énergie) et effet photoélectrique (photon extérieur)*

## 7. Diagrammes de désintégration

- Certains noyaux ont plusieurs modes possibles de désintégration. Par exemple : le  $^{64}\text{Cu}$  se désintègre soit par émission  $\beta^-$  ou  $\beta^+$ , soit par capture électronique CE.
- Le schéma de désintégration d'une substance radioactive est une représentation graphique de toutes les transitions de cette désintégration, et de leurs relations. Les niveaux d'énergie des noyaux père et fils y sont représentés par des traits horizontaux.

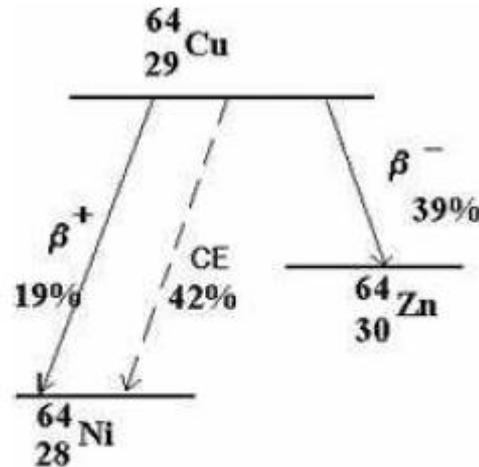
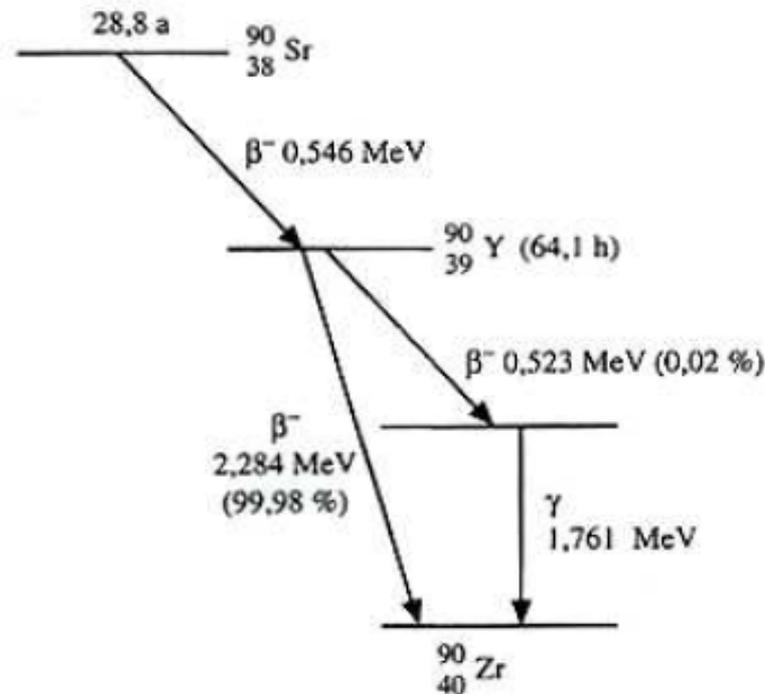


schéma de désintégration du cuivre 64

Autre exemple : schéma de désintégration du Strontium 90 (demi-vie de 28,8 ans)

- Le noyau-mère  $^{90}_{38}\text{Sr}$  se désintègre tout d'abord en Yttrium  $^{90}_{39}\text{Y}$  avec un temps de demi-vie de 64,1 heures, en émettant des électrons d'une énergie cinétique maximum de 0,546 MeV.
- Ce noyau intermédiaire se désintègre ensuite en Zirconium  $^{90}_{40}\text{Zr}$ , de deux manières différentes :
  - Soit il se désintègre directement en un noyau stable de Zirconium, et ce avec une énergie de 2,284 MeV : la probabilité de cette désintégration est de 99,98%
  - Soit ce même noyau d'Yttrium peut se désintègre en un noyau excité de Zirconium, avec une énergie cinétique de 0,523 MeV : la probabilité de cette désintégration est donc de 0,02 %. Cette désintégration est suivie de l'émission d'un rayonnement  $\gamma$  de 1,761 MeV



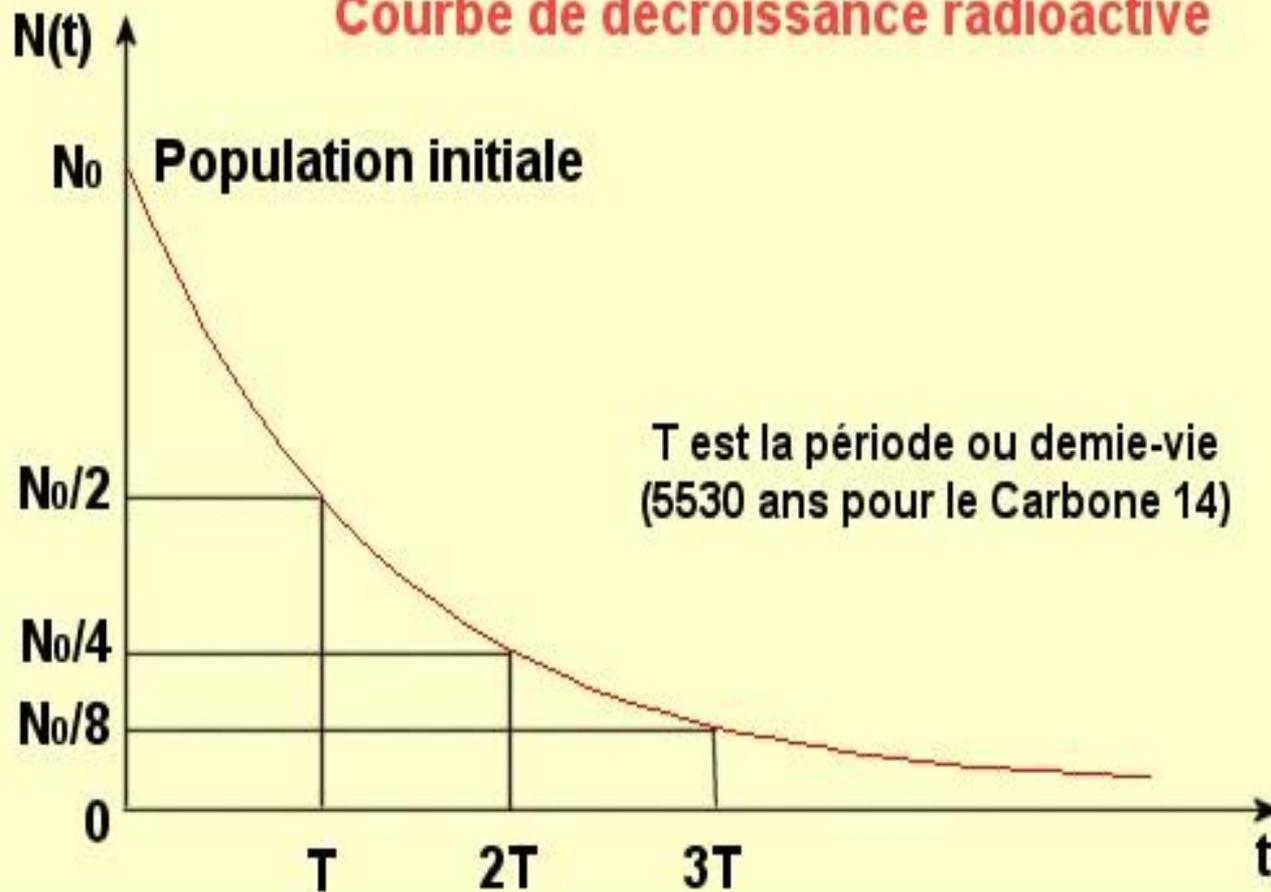
## 8. Evolution temporelle d'une population de noyaux

- La probabilité que présente un noyau radioactif de se désintégrer pendant l'unité de temps s'appelle la constante radioactive  $\lambda$ . Elle s'exprime comme l'inverse d'un temps, en  $s^{-1}$
- Ce caractère probabiliste fait qu'on ne connaît jamais le moment où un noyau donné va se désintégrer.
- Par contre, on peut statistiquement prédire le comportement d'un grand nombre de noyaux.

## 1) Loi de la décroissance

- **Evolution du nombre de noyaux radioactifs en fonction du temps**
- Le nombre de désintégrations qui se produisent à un instant donné est proportionnel au nombre d'atomes encore radioactifs à cet instant.
  - Sous une forme différentielle, le nombre d'atomes  $dN$ , qui se désintègrent au cours d'un temps  $dt$  est :  
 **$dN = - \lambda . N . dt$**
  - Fonction à dérivée négative : la courbe est une exponentielle décroissante (en coordonnées semi-logarithmiques la courbe est une droite).

## Courbe de décroissance radioactive



## ➤ **Constante de désintégration $\lambda$**

- La constante de désintégration  $\lambda$  est la **probabilité de désintégration du noyau** atomique par unité de temps (elle a pour dimension l'inverse d'un temps,  $s^{-1}$ ).

## ➤ Caractéristiques

- ✓ spécifique du radioélément
- ✓ indépendante :
  - du nombre initial de noyaux radioactifs présents
  - du temps d'origine (âge moyen du radioélément),
  - de l'état chimique de l'atome
  - de la pression et de la température

## ➤ Loi de la variation de $N(t)$

- La variation, en fonction du temps, du nombre d'atomes radioactifs  $N(t)$  contenus dans une préparation qui renferme initialement (au temps  $t = 0$ )  $N_0$  atomes est donnée par l'intégration de l'équation différentielle

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

## 2) Période radioactive (en seconde, heure ou année)

- Période radioactive  $T$ , ou : temps de demi-vie  $t_{1/2}$  : durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents se sont désintégrés

$$\left\{ \begin{array}{l} N\left(\frac{t_1}{2}\right) = \frac{N_0}{2} \\ \text{or : } N(t_{1/2}) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \end{array} \right. \quad \text{donc : } \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t_{1/2}} \quad \text{et} \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$$
$$\ln\left[\frac{1}{2}\right] = \ln\left[e^{-\lambda t_{1/2}}\right] \Leftrightarrow -\ln 2 = -\lambda t_{1/2}$$

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

$$T = 0,693/\lambda$$

$$\text{Ex : } {}^{99}\text{Tc} \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda = 3,209 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \\ t_{1/2} = 6 \text{ h} \end{array} \right.$$

# 3) Activité d'une source

## 3.3.2. Activité de la source radioactive

On appelle activité d'une source radioactive le nombre de noyaux qui se désintègrent par unité de temps :

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right|$$

- décroît parallèlement à  $N(t)$
- par définition : nombre positif (valeur absolue)

L'activité est proportionnelle à la constante de désintégration et au nombre de noyaux radioactifs présents :

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

L'activité d'une source diminue au cours du temps de la même manière que le nombre de noyaux radioactifs. Ainsi :

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

## 3.3.3. Unités d'activité

### Unité d'activité du système international : le Becquerel (Bq)

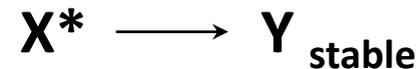
- correspond à une désintégration par seconde
- activité de 1 Bq extrêmement faible, en pratique, on utilise les multiples :
  - méga-becquerel (MBq) =  $10^6$  Bq
  - giga-becquerel (GBq) =  $10^9$  Bq
- Activités couramment employées en médecine nucléaire :
  - diagnostic : quelques dizaines à quelques centaines de MBq
  - thérapie : dépasse souvent le GBq

### Unité d'activité historique : le curie (Ci)

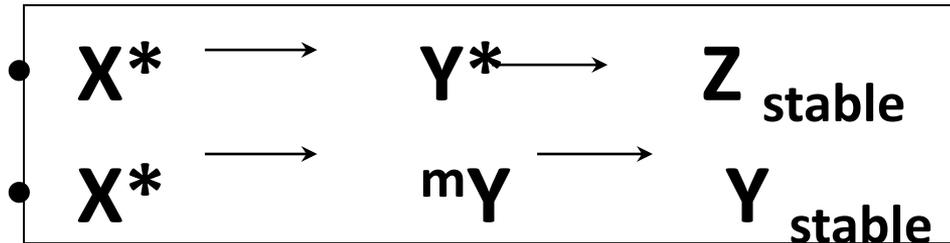
- correspond environ ( $\pm 1\%$ ) au nombre de désintégrations par seconde dans 1g de radium (étalon isolé par Marie Curie)
- activité de 1 Ci élevée ( $1\text{Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$  Bq) : on utilise les sous-multiples :
  - milli-curie (mCi) =  $3,7 \cdot 10^7$  Bq
  - micro-curie ( $\mu\text{Ci}$ ) =  $3,7 \cdot 10^4$  Bq

## 9. Filiations radioactives

- Un certain nombre de radionucléides donnent par décroissance un autre nucléide, lui même radioactif ou instable (états métastables :émission de rayonnements gamma par désexcitation des noyaux).
- La filiation la plus simple d'un isotope radioactif « père » et d'un isotope stable « fils » :



- Elle peut donc comporter des états instables intermédiaires, soit sous forme d'états radioactifs (notés par \*), soit sous forme d'états métastables (notés par m) :



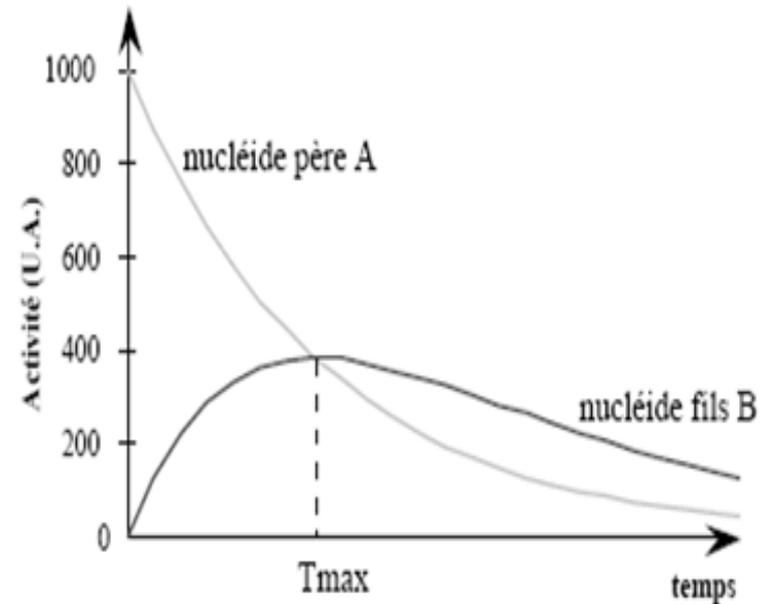
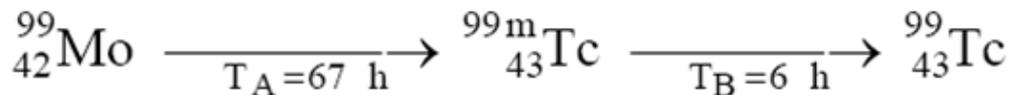
Ceci dépend de la période de l'élément père et du fils.

En conséquence, on peut avoir deux types d'équilibre entre les 02:

- **Equilibre de régime**
- **Equilibre séculaire**

# 9.1 Equilibre de régime

- Lorsque le nucléide père décroît assez rapidement en donnant naissance à un radioélément fils avec chacun sa propre période (T), il arrive à un certain moment que leurs activités deviennent égales,
- À partir de là, l'activité A du radioélément fils commence à décroître au même niveau que celle du nucléide père.
- Exemple: le couple Molybdène-Technétium



- L'application médicale concrète de ce type de filiation est le générateur de radio-isotopes « Molybdène-Techne-<sup>99</sup>mium ».
- Il est constitué par un couple nucléaire père-fils, tel que la séparation de l'élément fils de son précurseur permet de disposer du nucléide désiré avec un degré de pureté radionucléidique élevé.
- A l'équilibre 
$$T_{MAX} = \frac{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

## 9.2 Equilibre séculaire

- Lorsque la période  $T$  du père est  $\gg$  à  $T$  du radioélément fils, et l'activité  $A$  du nucléide père est constante, l'activité du fils va augmenter jusqu'à arriver au même niveau que celle du nucléide père et va rester constante.

