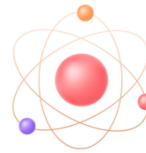


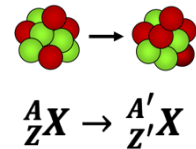
# Les transformations radioactives

## I - Généralités

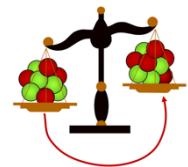
### A - Introduction



**DEFINITION :** Une transformation radioactive est une **mutation**, une désintégration spontanée d'un noyau atomique



Contrairement à une réaction chimique qui a lieu au niveau du cortège électronique, la **réaction nucléaire** entraîne une **modification du noyau de l'atome**. Cette modification de la structure amène à une **modification de la nature chimique de l'élément** puisque le nombre de charge Z a été modifié. Un noyau père se transforme en un noyau fils de moindre masse.



Lors de cette transformation, il y a :

- Une perte de masse
- Un gain d'énergie de liaison  $E_L$
- Une libération d'énergie sous forme soit d'une particule, soit d'un photon : c'est la **radioactivité** !!

La transformation radioactive irréversible s'écrit en général :



Le **noyau X**, noyau père, est **systématiquement radioactif** (sa radioactivité conditionne la transformation, *cela signifie que c'est cette instabilité qui la rend possible*) et se transforme en **noyau Y**, le noyau fils, qui peut être soit radioactif (et il subira à son tour une transformation radioactive), soit stable. De nombreuses particules peuvent être émises : n, e<sup>-</sup>, e<sup>+</sup>, α. L'émission d'un photon est inconstante en fonction du type de transformation.

Cette réaction :

- Provoque un **changement de nature** (variation du nombre de protons et/ou de neutrons) et/ou du **niveau d'énergie** du noyau (nombre de nucléons ne varie pas), il s'agit d'un **processus nucléaire**
- Concerne **UNIQUEMENT** les **noyaux INSTABLES** (rappel : noyau père obligatoirement radioactif)

- est un phénomène **probabiliste** : la probabilité pour qu'un noyau se transforme pendant un temps  $dt$  dépend de la constante radioactive  $\lambda$  ( qui est indépendante des conditions physico-chimiques de l'environnement et de l'âge de l'atome )
- est naturelle ou artificielle

La radioactivité est présente sur Terre au travers de **noyaux naturels** : 274 stables et 51 radioactifs (=instables, ces-derniers ont une demi-vie au moins égale à l'âge de la Terre, ils sont d'origine magmatique solaire où se crée un phénomène de fusion nucléaire) ; et de nombreux **noyaux radioactifs artificiels** : plus de 2500 possibles.

La radioactivité naturelle est **omniprésente** :

- Les rayonnements cosmiques
- La radioactivité tellurique : Uranium, Thorium, Potassium
- Le radon-222 ( $T_{1/2} = 3,8$  j) : gaz naturel radioactif
- Les eaux et les aliments

	Bq/kg
Eau douce	0,1
Eau de mer	12
Corps humain*	130

\* 4000 Bq pour 30kg  
Avec 1 Bq =  
1 désintégration/seconde  
\* 9000Bq pour 70kg

*Ne passez pas trop de temps sur cette partie, elle n'est jamais tombée au concours. A la limite apprenez qui a découvert quoi*

## B - Historique

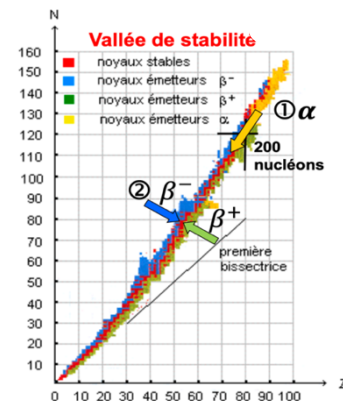
Après la découverte des Rayons X par Röntgen :

- 1896 : Henri Poincaré et Henri Becquerel cherchent un **lien entre la fluorescence des minerais et celle des rayons X**. Becquerel, Pierre et Marie Curie obtiendront un prix Nobel de physique en 1903.  
Expérience : Les sels d'Uranium exposés au soleil émettent des fluorescences qui imprègnent les plaques photosensibles, comme les rayons X. Cependant, à l'inverse de ces-derniers, ils imprègnent les plaques même sans aucune exposition lumineuse.  
Conclusion : l'Uranium émet son propre rayonnement non lié à une excitation lumineuse, donc différent des rayons X : « les rayons U » (Uraniques)
- 1898 : Pierre et Marie Curie observent ce même phénomène avec le Radium et le Polonium : ils le nomment la « **radioactivité** » et obtiennent un prix Nobel de chimie en 1911.
- 1900 : Rutherford et Villard isolent 3 types différents de rayonnements issus de l'Uranium et du Radium :  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ .
- 1934 : Frederic Joliot et Irene Joliot-Curie découvrent la **radioactivité artificielle** et obtiennent un prix Nobel de chimie en 1935.
- 1940 : premières applications médicales de la radioactivité : le **Phosphore  $^{32}\text{P}$**  (pour traiter les leucémies, aujourd'hui abandonné) et l'**iode  $^{131}\text{I}$**  ( en traitement contre le cancer de la thyroïde, toujours utilisé).
- 1960 : création des premiers services hospitaliers de médecine nucléaire avec notamment l'utilisation d'éléments radioactifs pour le traitement ou l'imagerie.

## C - CLASSIFICATION

Les noyaux radioactifs instables vont se transformer en noyaux stables. Selon le noyau d'origine on distingue :

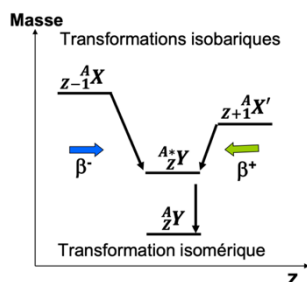
- La **radioactivité  $\alpha$**  avec la partition d'un **noyau lourd** ( $A > 200$  nucléons), sur le graphique → ①
- Les **transformations isobariques** : transformation neutron  $\leftrightarrow$  proton ; si excès de neutrons, émission d'un  $\beta^-$  et si excès de protons émission d'un  $\beta^+$ , sur le graphique → ②
- Les **transformations isomériques** : modification de l'énergie interne du noyau par désexcitation (*sans modification de la nature*)



## D - EVOLUTION DE LA MASSE

Sur ce schéma de la transformation, on représente la masse des noyaux en fonction de leur nombre de protons Z. Toutes les transformations ci-dessous amènent le nucléide vers une **masse inférieure** (les masses étant représentées par les segments horizontaux).

Dans un premier temps, une **transformation isobarique** (2 cas de figure possibles) :

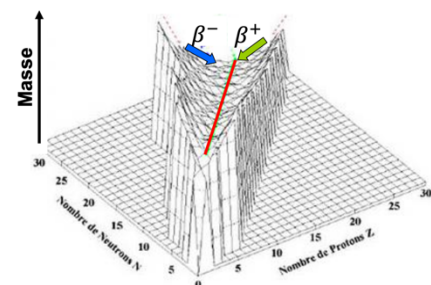


- Le noyau père  ${}_{Z-1}^AX$  a un excès de neutrons et on va alors observer une **émission  $\beta^-$**  qui le transformera en noyau fils excité  ${}_{Z}^{A*}Y$  (il s'agit ici de la transformation d'un neutron en un proton avec changement d'élément puisque Z varie)
- Le noyau père  ${}_{Z+1}^{A'}X'$  a un excès de protons et on va alors observer une **émission  $\beta^+$**  qui le transformera en noyau fils excité  ${}_{Z}^{A*}Y$  (il s'agit ici de la transformation d'un proton en un neutron avec changement d'élément puisque Z varie)

Dans un second temps, une **transformation isomérique** :

- Le noyau père  ${}_{Z}^{A*}Y$  est en excès d'énergie interne, on observera alors une **émission  $\gamma$**  ou une **conversion interne** le transformant en **noyau fils stable  ${}_{Z}^AY$**  (ici l'élément chimique reste le même puisque le nombre de protons et de neutrons ne varie pas)

Ici, une troisième dimension est ajoutée sur la hauteur de la **vallée de la stabilité** : la masse. A chaque transformation, les éléments vont se rapprocher du **fond de la vallée** qui correspond aux **éléments les plus légers et stables**. Cela crée cette vallée de stabilité.



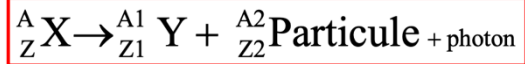
Au final, on a TOUJOURS une évolution vers +++ :

- Une **masse minimale**
- Une **énergie de liaison  $E_L$  maximale**
- Une **stabilité maximale des nucléons entre eux**
- Une **libération d'énergie sous forme de rayonnement radioactif**

## E - LOIS DE CONSERVATION

Les transformations nucléaires répondent à des **lois de conservation** toujours appliquées :

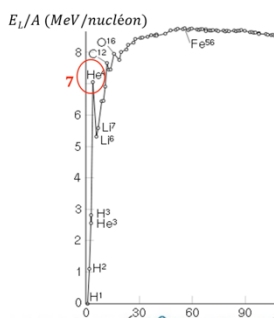
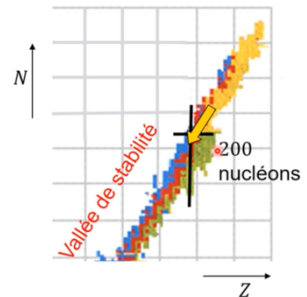
- Conservation du **nombre de masse A** et du **nombre de charge Z** (a lieu entre le système initial et final donc avant et après la transformation,  $A=A_1+A_2$  et  $Z=Z_1+Z_2$  sur la transformation ci-dessus)
- Conservation de l'**énergie totale** (cinétique, potentielle et rayonnante)
- Conservation de la **quantité de mouvement**
- **La masse totale NE SE CONSERVE PAS** : la masse du père n'est pas égale à la masse du fils et de la particule cumulée



**ATTENTION** : le nombre de masse A se conserve mais la masse totale, elle, varie !!

## II - LA RADIOACTIVITÉ ALPHA

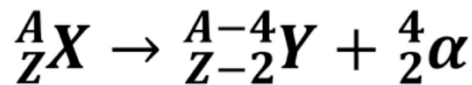
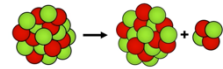
La **radioactivité alpha** concerne les **noyaux lourds** ( $A > 200$ ), ils sont instables car possédant beaucoup de nucléons, leur  $E_L/A$  est diminuée. En parallèle, le noyau est lourd et possède alors beaucoup de protons, les forces coulombiennes répulsives entre leur charge positive sont donc très importantes. Les atomes « pères » sont présents dans la nature avec une longue demi-vie. Leur but est de perdre des protons et des neutrons grâce à des émissions alpha afin d'être plus léger et d'atteindre la vallée de la stabilité. On peut observer des émissions successives de particules  $\alpha$  par paliers jusqu'à l'obtention d'un **élément stable et léger** (ex : *Uranium 238* -> *Plomb 206*, stable).



La radioactivité alpha correspond à **l'émission d'une particule  $\alpha$** , noyau à 4 nucléons ( $A = 4$  et  $Z = 2$ ), qui est aussi **l'atome d'Hélium  ${}^4_2\text{He}$** . Cette même particule peut donc s'écrire de différentes manières :  ${}^4_2\text{He}$ ,  $\text{He}^{++}$ ,  $\alpha$  ou encore  $\alpha^{++}$ .

Le noyau d'Hélium est un noyau particulièrement stable avec une énergie de liaison par nucléons assez élevée à **7 MeV/A** (il se situe entre  ${}^3\text{H}$  juste avant avec une  $E_L < 3$  et  ${}^6\text{Li}$  juste après avec une  $E_L < 5,5$ ) puisque l'Hélium est **doublement magique** (2 protons et 2 neutrons). Il s'agit du seul noyau complexe pouvant être émis spontanément.

## A - REACTION DE DESINTÉGRATION

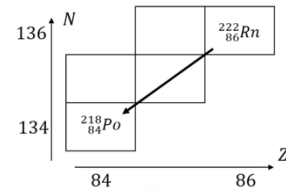


Le noyau père X se transforme en noyau fils Y à A-4 et Z-2 avec l'émission de la particule  $\alpha$ . On retrouve bien les **lois de conservation** nécessaires :

- Conservation du nombre de masse A ( $A=A-4+4$ )
- Conservation du nombre de charge Z ( $Z=Z-2+2$ )

Lorsque le nombre de charge Z varie, un nouvel élément chimique est créé.

Exemple : Radon -> Polonium  ${}_{86}^{222}\text{Rn} \rightarrow {}_{84}^{218}\text{Po} + {}_2^4\alpha$



## B - BILAN MASSE ÉNERGIE

L'**énergie disponible** est proportionnelle à la perte de masse du noyau  $\Delta M$  au cours de la transformation. Elle correspond à la différence des masses nucléaires entre l'**état initial** (masse du père) et **final** (masse du fils et de la particule) de la transformation. Une certaine énergie proportionnelle à la perte de masse du noyau sera donc disponible « en trop » et sera expulsée sous forme de particule  $\alpha$ .

$$\Delta M = \underbrace{\mathcal{M}(A, Z)}_{\text{noyau d'origine}} - \underbrace{Zm_e}_{\text{noyau fils}} - [\underbrace{\mathcal{M}(A-4, Z-2)}_{\text{noyau fils}} - \underbrace{(Z-2)m_e}_{\alpha}] + \underbrace{\mathcal{M}(4, 2)}_{\alpha} - 2m_e$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \cancel{Zm_e} - \mathcal{M}(A-4, Z-2) + \cancel{(Z-2)m_e} - \mathcal{M}(4, 2) + \cancel{2m_e}$$

Simplification de la parenthèse, le + devient un -.

Les électrons s'annulent ( $Z-2+2=Z$  et donc  $+Z-Z$  s'annulent).

$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A-4, Z-2) - \mathcal{M}(4, 2)$$

*Apprenez-moi bien cette dernière formule ++, c'est ce qu'il y a à vraiment retenir, ne vous prenez pas trop la tête.*

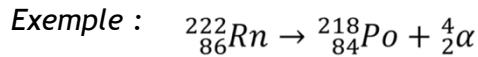
Après simplification, on se rend compte que la **différence de masse des noyaux** est égale à la masse de l'atome père moins la masse de l'atome fils moins la masse de l'atome d'Hélium +++.

**ATTENTION :** Souvent, seulement la différence de masse des atomes sera donnée, c'est le cas ici. Il faut donc soustraire les électrons correspondants afin de retrouver sa masse nucléaire (**RAPPEL :** sur un atome, il y a autant de protons que d'électrons).

Après avoir trouvé la perte de masse du noyau, on peut calculer l'**énergie rendue disponible** grâce à la loi d'équivalence masse-énergie ( $E=mc^2$ ) lors de la transformation :

$$E_d = \Delta M \times 931,5$$

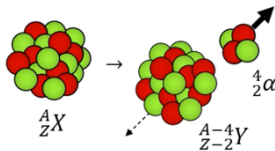
Avec  $\Delta M$  en **unité de masse atomique (u)** et  $E_d$  finalement donné en **MeV**.



$$\mathcal{M}(222,86) = 222,0176; \mathcal{M}(218,84) = 218,009; \mathcal{M}(4,2) = 4,0026$$

$$\Delta M = 222,0176 - 218,009 - 4,0026 = 6 \cdot 10^{-3} u \quad \text{Energie disponible: } E_d = 6 \cdot 10^{-3} \times 931,5 = 5,6 \text{ MeV}$$

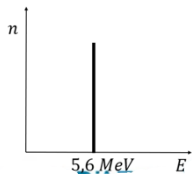
## C - SPECTRE ÉNERGÉTIQUE



L'énergie de la transformation ( $E_d$ ) est libérée **exclusivement** sous forme **d'énergie cinétique** qui se partage entre le noyau fils ( $E_c$  de recul, négligeable en pratique) et la particule  $\alpha$ .

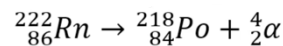
Puisqu'il y a conservation de la quantité de mouvement ( $p=Mv$ ), on considère que la **particule  $\alpha$**  (masse faible donc vitesse élevée) emporte la **quasi-totalité** (la totalité dans nos calculs) de l'**énergie cinétique** par rapport au noyau fils (masse élevée donc vitesse faible).

$$E_\alpha = \frac{M(Y)}{M(Y) + M(\alpha)} E_d \cong E_d$$



La particule  $\alpha$  possède une énergie représentée sous forme d'un **spectre de raies**. Une seule valeur quantifiée correspond à l'énergie cinétique de la particule  $\alpha$  (comprise entre 4 et 10 MeV).

Exemple : Radon  $\rightarrow$  Polonium



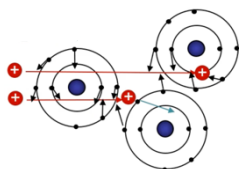
$$\text{Energie disponible: } E_d = 6 \cdot 10^{-3} \times 931,5 = 5,6 \text{ MeV}$$

## D - PARCOURS DANS LA MATIÈRE

La particule  $\alpha$  est **lourde** ( $A=4$ , juste avant on disait qu'elle était légère puisque cela dépend avec quel élément elle est comparée) et **chargée** ( $Z=2$ ). On considère la vitesse de cette particule comme **faible**, mais cela est non relativiste puisqu'on la compare à la vitesse de la lumière.

Exemple:  $4 \text{ MeV}$ ;  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ ;  
 $v = 13\,900 \text{ km.s}^{-1}$  ( $v/c = 5\%$ )

Pour illustrer : Si une particule  $\alpha$  a une énergie cinétique de  $4 \text{ MeV}$ , grâce à la formule ci-dessus on en déduit sa vitesse de  $13\,900 \text{ km/s}$ . C'est énorme, mais cela ne correspond qu'à  $5\%$  de la vitesse de la lumière, ce qui est minime.



Cette particule  $\alpha$  va avoir des interactions dans la matière sous forme d'ionisations (arrache des  $e^-$  au cortège électronique des atomes). Elle possède une **trajectoire rectiligne**, liée à la **masse importante** de la particule peu déviée par ces ionisations.

La **courbe de Bragg** correspond au nombre d'ionisations provoquées par la particule  $\alpha$  (*ions/cm sur le graphique*) en fonction de la profondeur de pénétration dans la matière (*d*).

En début de parcours, les ionisations sont **constantes et modérées** puis, en fin de parcours, il y a une **très nette augmentation** du nombre d'ionisations et du dépôt d'énergie.

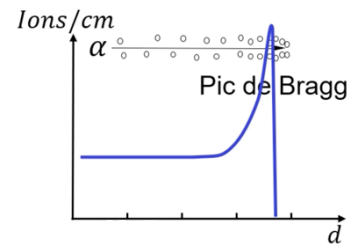
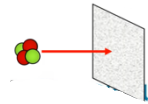
Cette courbe, caractéristique des particules chargées et lourde dans la matière, est liée au **pouvoir d'arrêt** (= perte d'énergie cinétique de la particule en fonction de la distance) de la particule  $\alpha$  :

$$S(T) = -\frac{dT}{dx} = k \frac{Z^2}{v^2}$$

Le pouvoir d'arrêt augmente nettement en fin de parcours lorsque la vitesse diminue.

La particule  $\alpha$  a un **trajet assez court** (1cm dans l'air et 10 $\mu$ m dans les tissus) mais possède un **effet biologique très important** (ionisations ++) notamment au niveau du **pic de Bragg**, donc juste avant l'arrêt définitif de la particule  $\alpha$ .

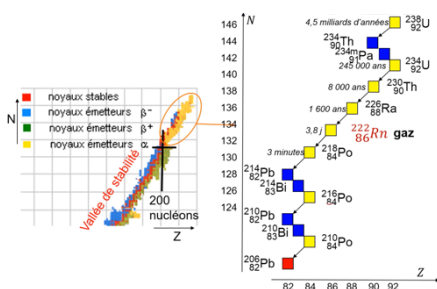
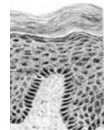
Elles sont arrêtées facilement par la matière : par une fine feuille de papier.



## E - APPLICATIONS BIOMÉDICALES

Il existe des applications en radioprotection :

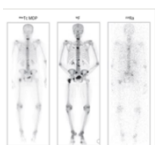
- L'irradiation par une source **externe** n'est en **aucun cas dangereuse** puisque la couche cornée (cellules mortes) absorbe les particules  $\alpha$ .
- L'irradiation par une source **interne** (inhalation ou absorption) il y aura des **effets radiobiologiques importants** puisque le nucléide est au contact direct avec les cellules.



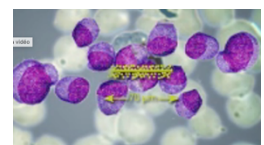
*Exemple : Le Radon-222 est un émetteur alpha naturel gazeux. Il est le seul descendant gazeux de l'Uranium-238, présent dans les régions granitiques, qui donnera le Radon-222 qui s'échappera des failles granitiques. Il s'infiltrera alors dans les maisons puis, lorsqu'il sera inhalé par l'habitant il se retrouvera directement au contact de l'épithélium pulmonaire avec de nombreux effets sur la santé. Comme on le voit sur le schéma, une*

*fois inhalé le Radon-222 va subir plusieurs désintégrations avec l'émission de plusieurs particules  $\alpha$  qui dégraderont l'épithélium.*

Il existe aussi des applications en thérapeutique :



Cette utilisation est nommée la **radiothérapie métabolique**, ce qui est intéressant avec ces particules est leur **fort effet ionisant à courte distance**. Il est alors plus facile de cibler les **cellules cancéreuses** (trajet des particules  $\alpha$  = 10 à 20  $\mu$ m, ce qui correspond à 1 à 2 cellules) sans toucher les cellules saines.



*Courage à tous vous êtes trop forts*