

RADIOACTIVITE

Maria-João SANTIAGO-RIBEIRO

20 février 2013

Modes de transformation du noyau

Un noyau instable va tendre vers la stabilité en se transformant :

- **Désintégration**

- Libération de l'excès énergétique avec modification de la structure du noyau

- **Désexcitation**

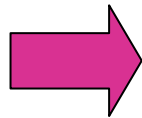
- Libération de l'excès énergétique sans modification de la structure du noyau

- **Toute transformation radioactive obéit aux lois physiques générales de la conservation de la charge électrique et de l'énergie totale**

Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

Atome fils dont le $Z \neq$ de celui de l'atome père



**Élément chimique différent
(transmutation)**

- Désintégration alpha (α)
- Désintégration bêta moins (β^-)
- Désintégration bêta plus (β^+)
- Capture électronique



Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

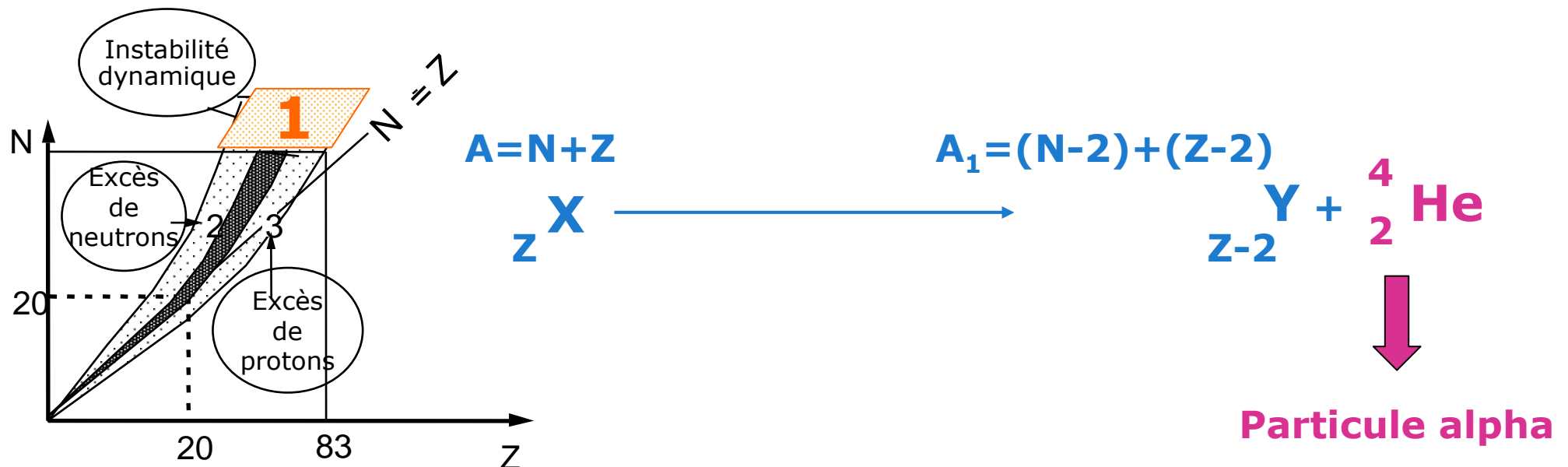
- Désintégration alpha (α) (particule chargée)

→ Tous les isotopes des éléments chimiques lourds, $Z > 82$, sont radioactifs : **zone 1**

→ Pas de disproportion entre N et Z, mais trop gros

→ Stabilité : diminuer leur masse : \uparrow **${}^4\text{He}$**

→ Transformation non isobarique (A varie)



Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration alpha (α)

→ **Emetteur α pur** : noyau fils dans l'état fondamental



→ **Emetteur non pur** : noyau fils dans un état excité

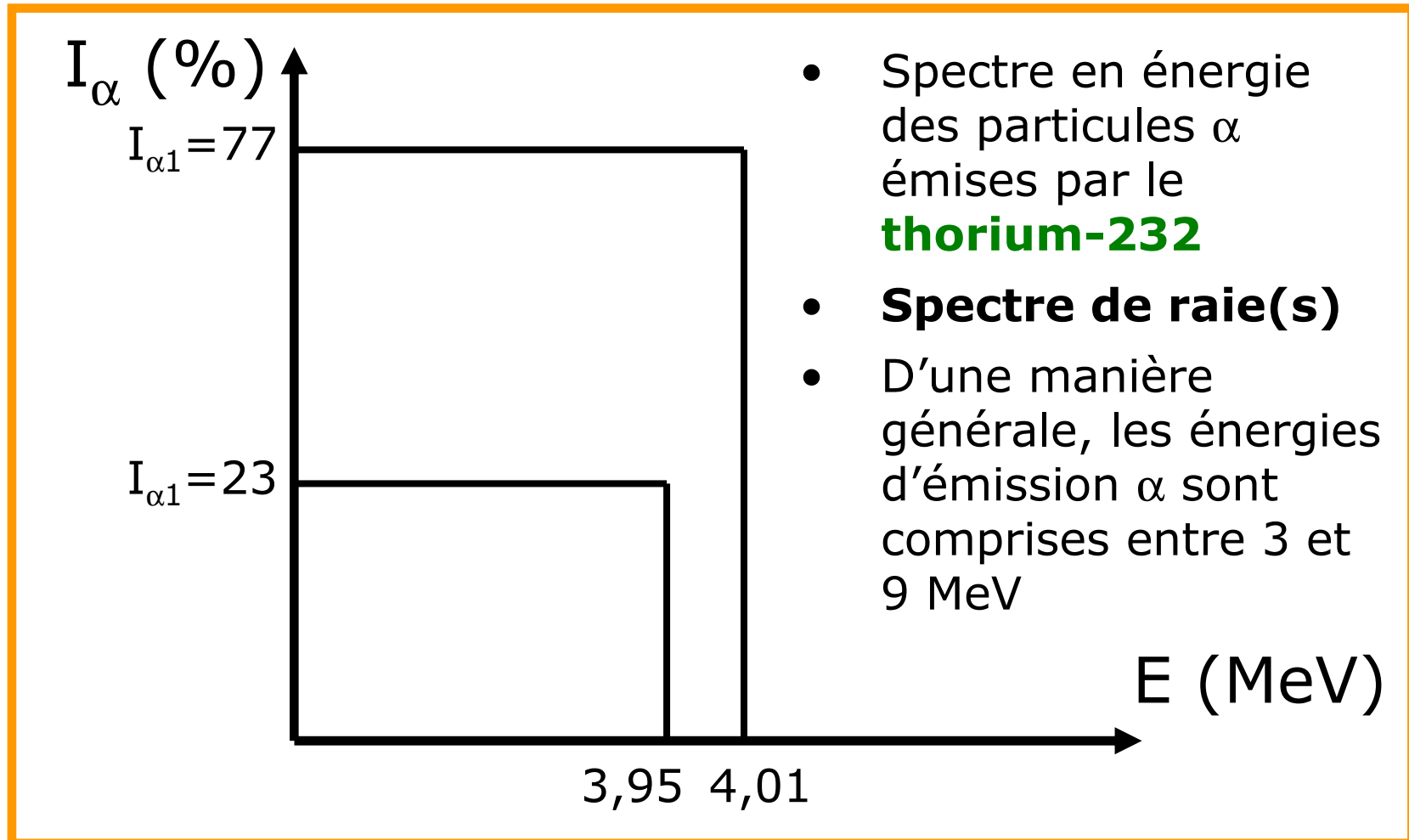


- Peu d'intérêt en imagerie (thérapie)

Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration alpha (α)



Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration alpha (α)

- Spectre d'émission qui peut être défini par le nombre N de particules alpha émises en fonction de leur énergie
- Spectre dit discret car non continu
- Spectre composé d'une ou plusieurs raies

Modes de transformation du noyau

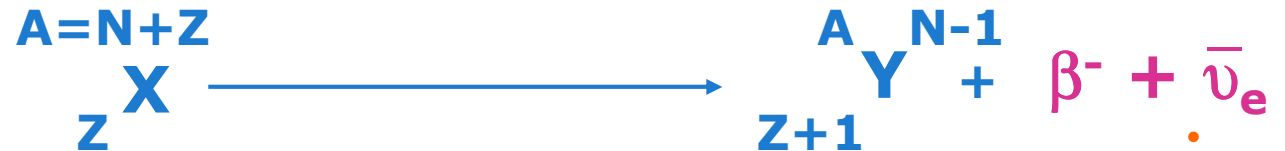
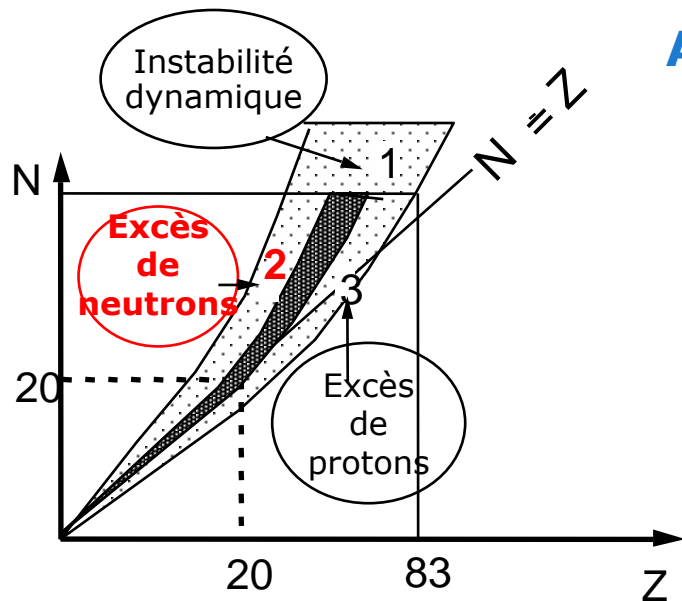
Désintégration radioactive

- Désintégration bêta moins (β^-)

→ Tous les isotopes ayant un excès de neutrons sont radioactifs : **zone 2**

→ Stabilité : neutron \rightarrow proton : $\uparrow \beta^-$

→ Transformation isobarique ($A = \text{constant}$)



$$E = E_{\beta^-} + E_{\bar{\nu}_e}$$

Antineutrino

Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration bêta moins (β^-)

→ Tous les isotopes ayant un excès de neutrons sont radioactifs : **zone 2**

→ Stabilité : neutron \rightarrow proton : $\uparrow \beta^-$

→ Transformation isobarique ($A = \text{constant}$)



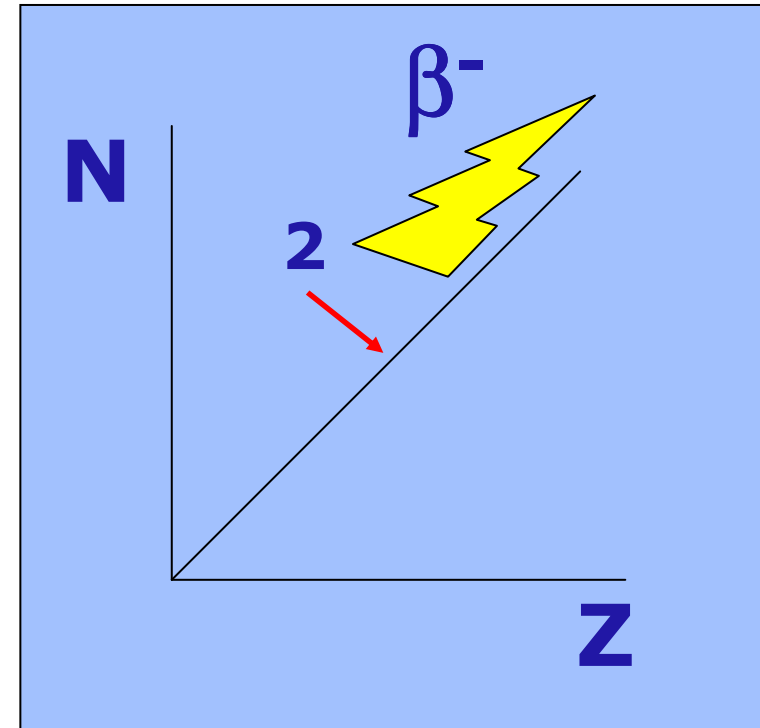
Antineutrino

- particule électriquement neutre et de masse infiniment petite
- n'interagit pratiquement pas avec la matière (la probabilité qu'un neutrino de quelques MeV traversant la terre soit absorbé est de l'ordre de 10^{-10})

Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration bêta moins (β^-)



Modes de transformation du noyau

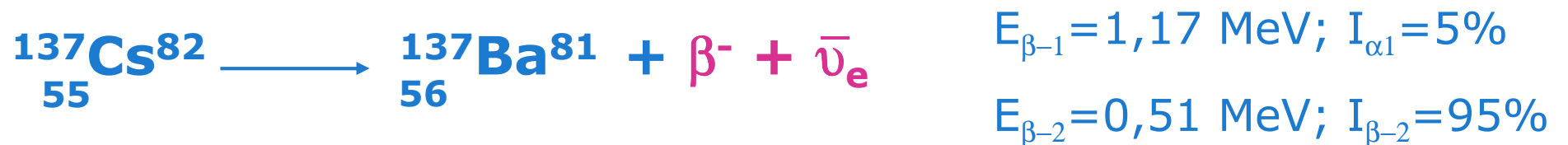
Désintégration radioactive

- Désintégration bêta moins (β^-)

→ **Emetteur β^- pur** : noyau fils dans l'état fondamental



→ **Emetteur non pur** : noyau fils dans un état excité

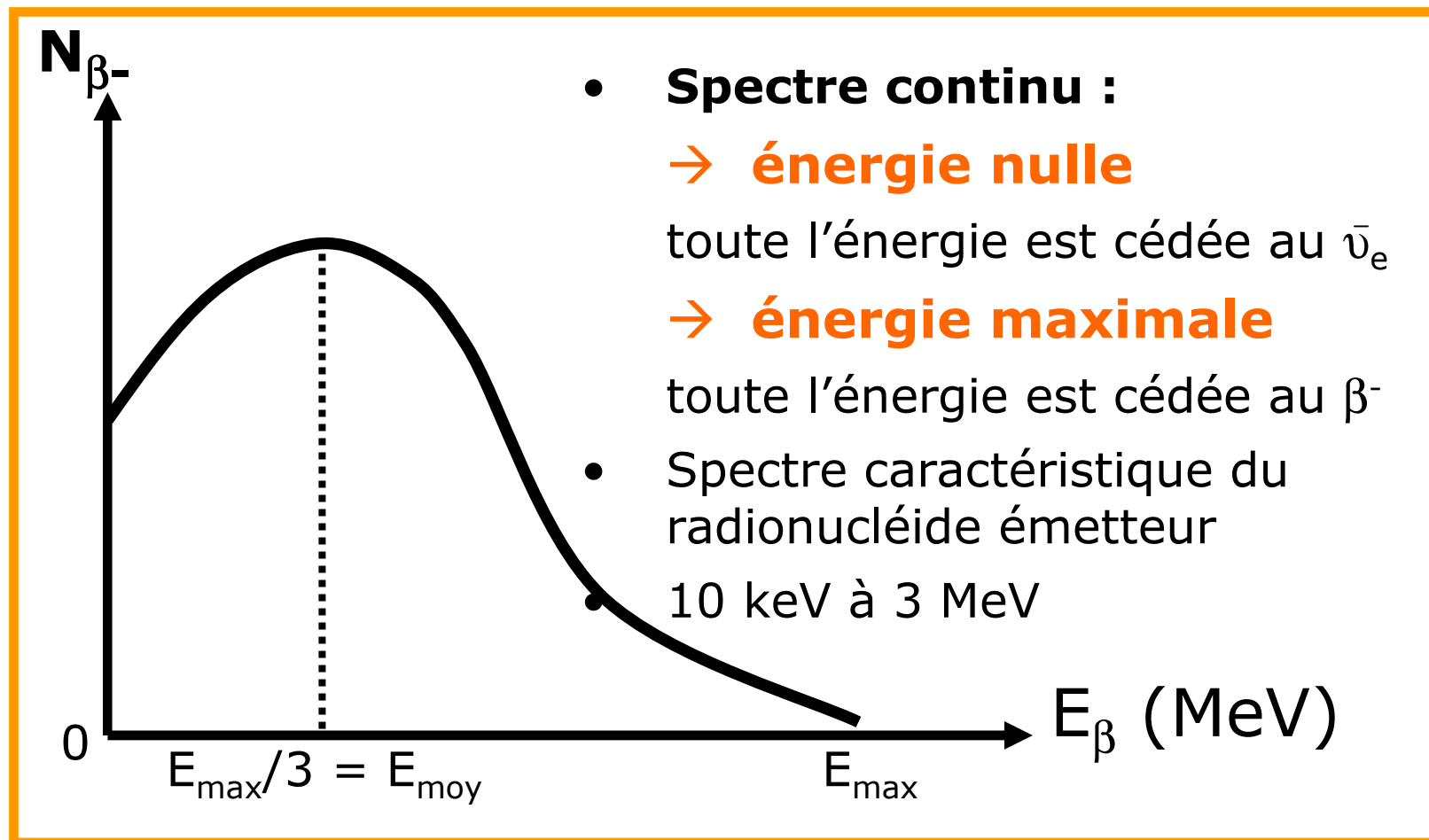


Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration bêta moins (β^-)

N_{β^-} : nombre de particules β^- d'énergie donnée



Modes de transformation du noyau

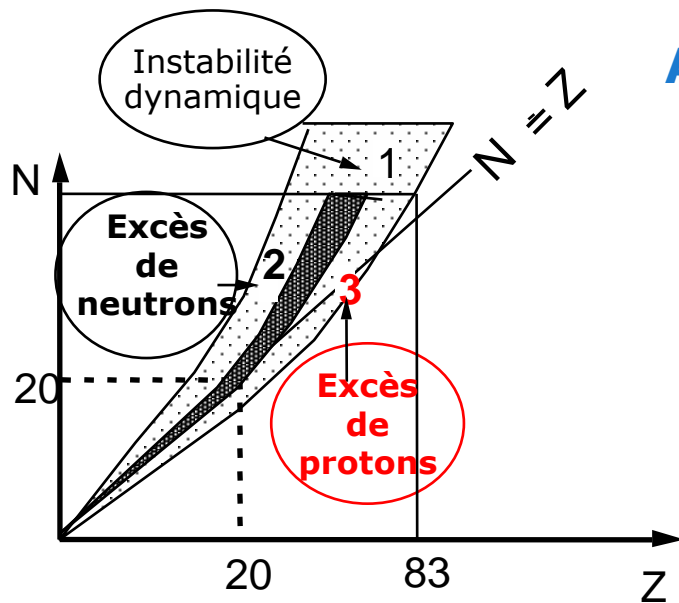
Désintégration radioactive

- Désintégration bêta plus (β^+)

→ Tous les isotopes ayant un excès de protons sont radioactifs : **zone 3**

→ Stabilité : proton \rightarrow neutron : $\uparrow \beta^+$ (=positon)

→ Transformation isobarique ($A = \text{constant}$)



$$E = E_{\beta^+} + E_{\nu_e}$$

Neutrino

Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration bêta plus (β^+)

→ Tous les isotopes ayant un excès de protons sont radioactifs : **zone 3**

→ Stabilité : proton \rightarrow neutron : $\uparrow \beta^+$ (**=positon**)

→ Transformation isobarique ($A = \text{constant}$)

Instabilité
dynamique

$$A = N + Z$$

$$A \quad N+1$$

$\beta^+ + \nu$

Neutrino

- particule électriquement neutre et de masse infiniment petite
- n'interagit pratiquement pas avec la matière (la probabilité qu'un neutrino de quelques MeV traversant la terre soit absorbé est de l'ordre de 10^{-10})

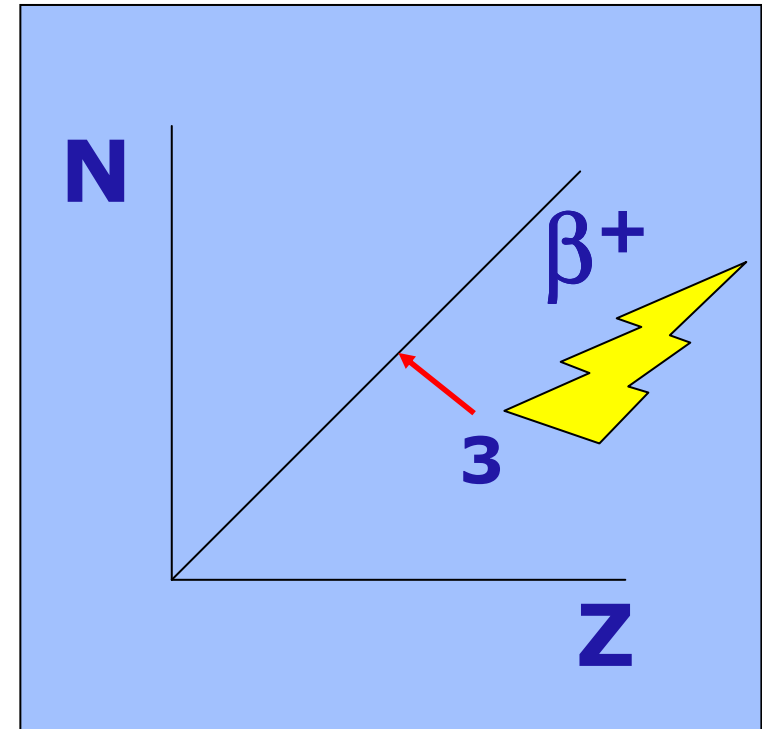
Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration bêta plus (β^+)



$$E_{\beta^+} = 1,20 \text{ MeV}; I_{\alpha 1} = 100\%$$



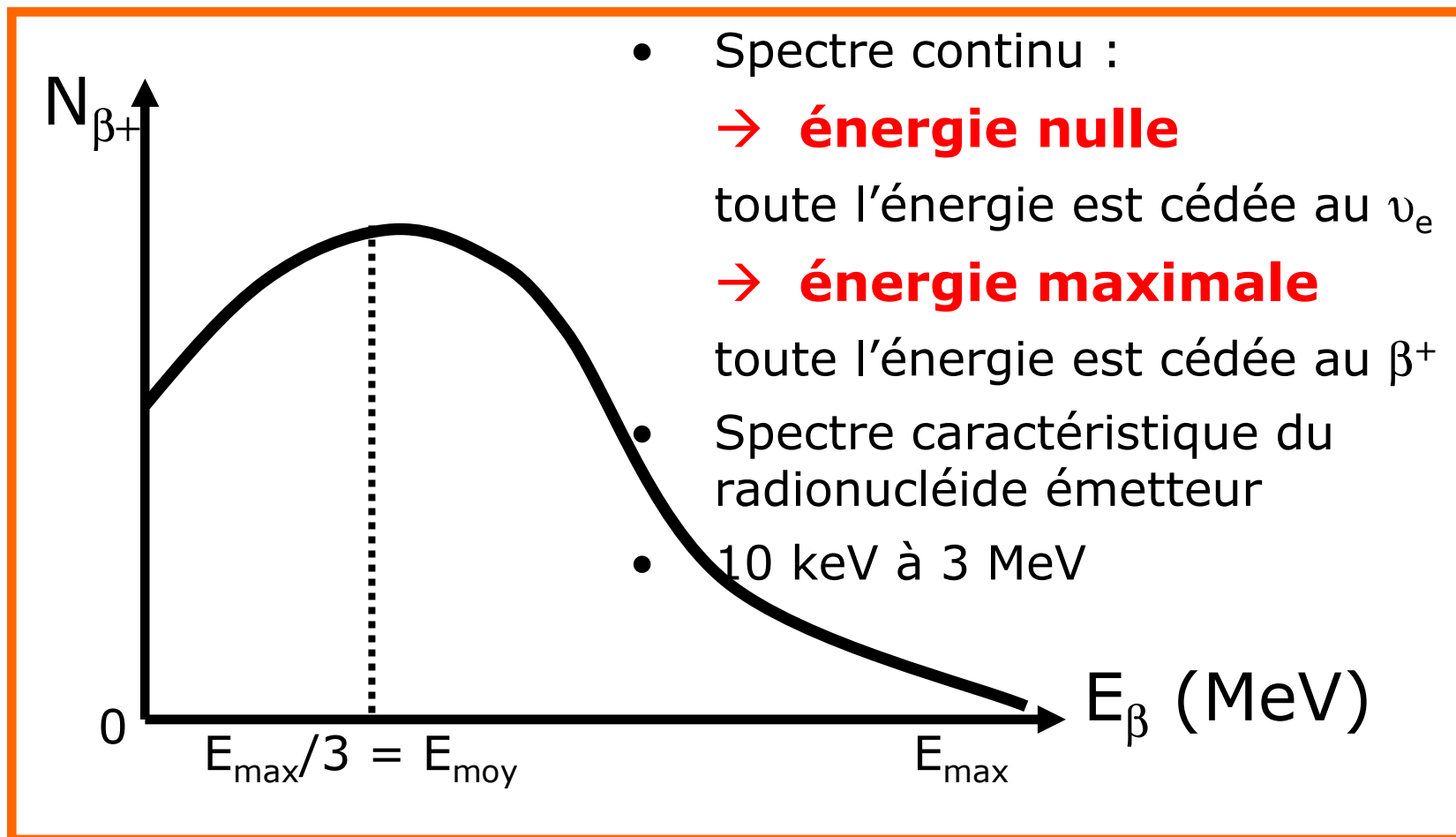
- Médecine (TEP)

Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration bêta plus (β^+)

N_{β^+} : nombre de particules β^+ d'énergie donnée



Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration bêta plus (β^+)

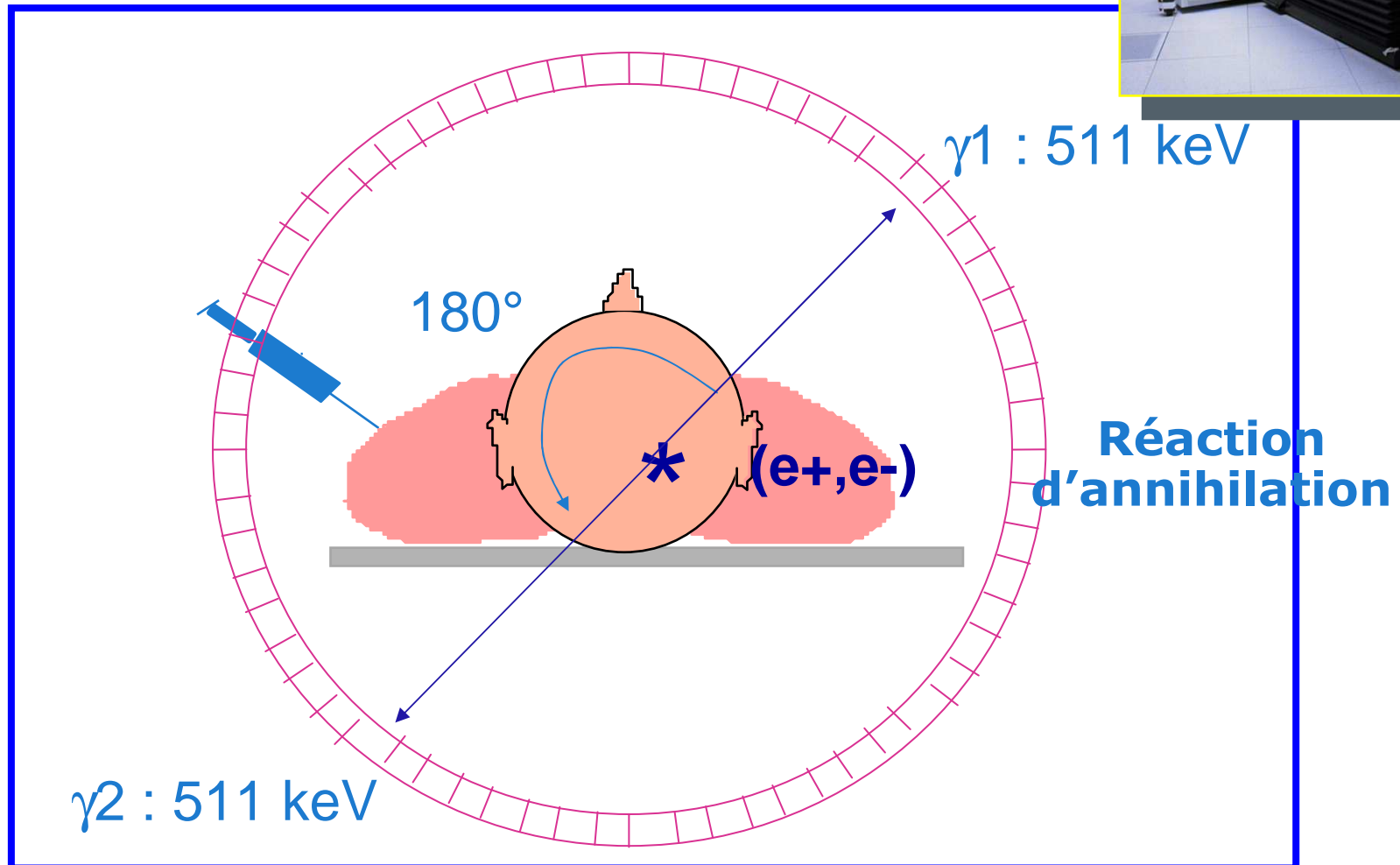
Le devenir du positon

- Epuisement de son énergie cinétique après des collisions multiples
 - $< 10^{-9}$ sec
 - à quelques mm du lieu de la transformation radioactive nécessaire
- Réaction d'annihilation
 - conservation de la quantité de mouvement (pratiquement nulle car les vitesses de l'électron et du positon sont négligeables)
 - conservation de l'énergie totale (égale à la somme des masses de l'électron et du positon)

Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration bêta plus (β^+)



Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Désintégration bêta plus (β^+)

Le devenir du positon

- Deux photons

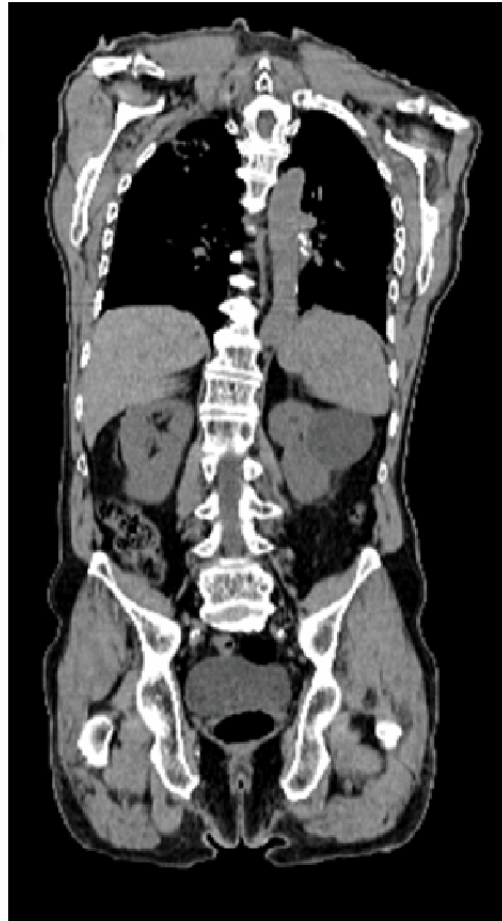
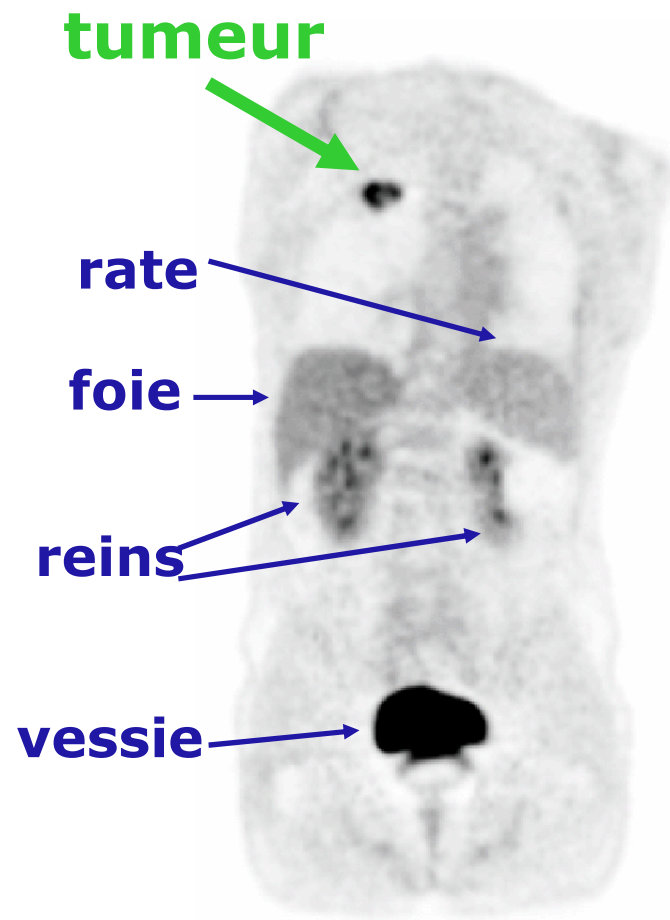
- même énergie (511 keV)
- émis dans des directions opposées
- quantité de mouvement globale nulle
- détection externe

- TEP

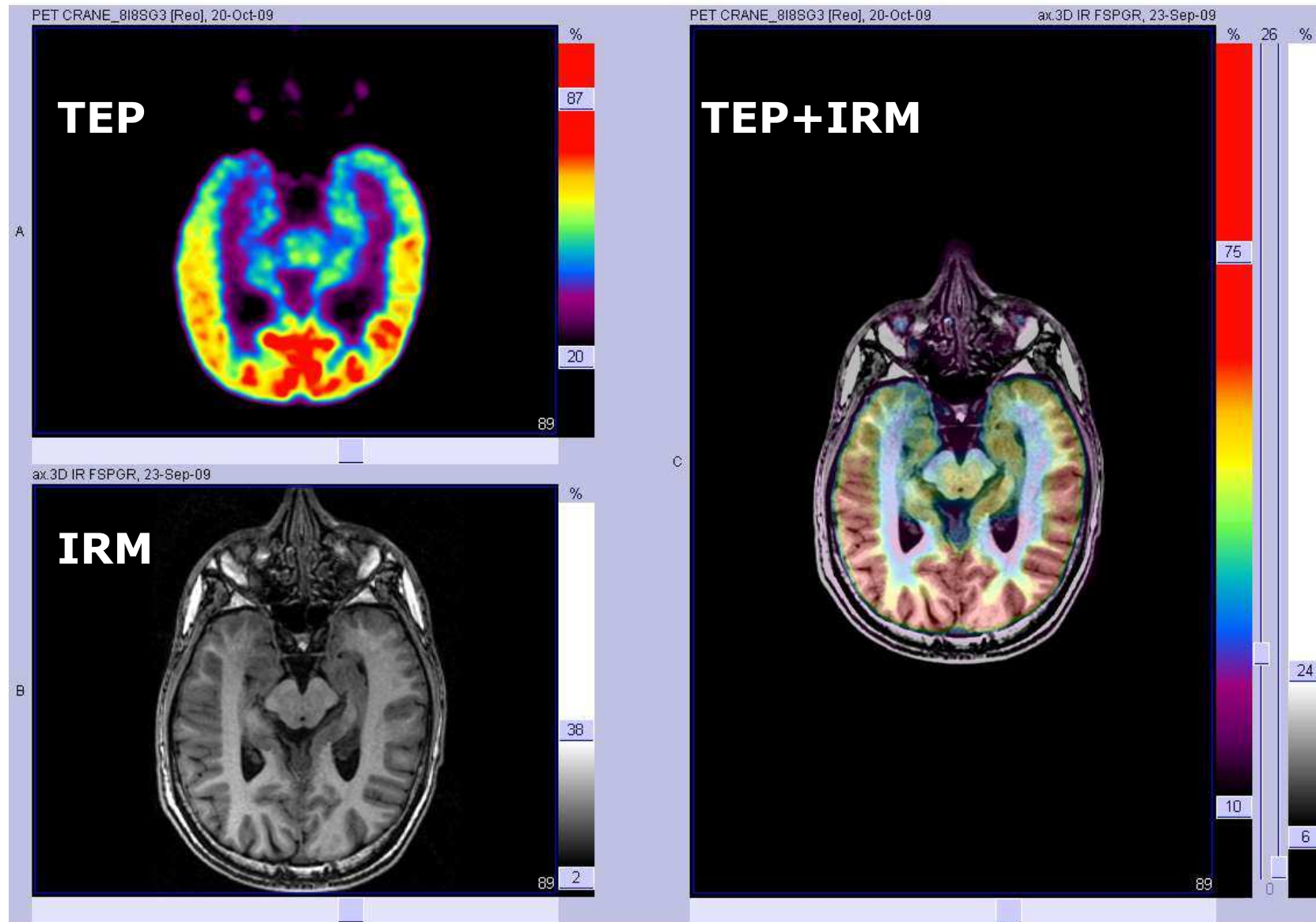
- carbone 11
- azote 13
- oxygène 15
- fluor 18



Applications médicales des isotopes radioactifs : émetteurs β^+



Applications médicales des isotopes radioactifs : émetteurs β^+

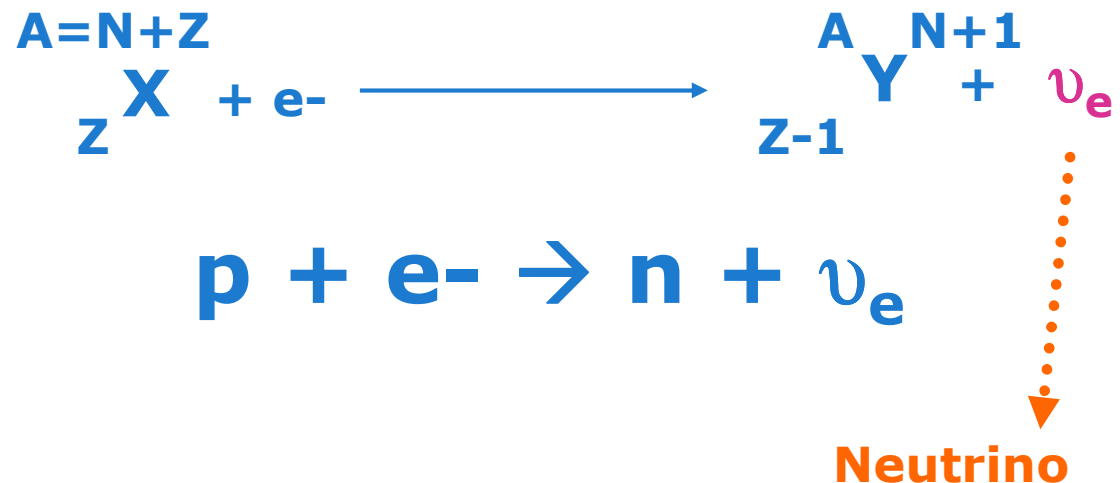
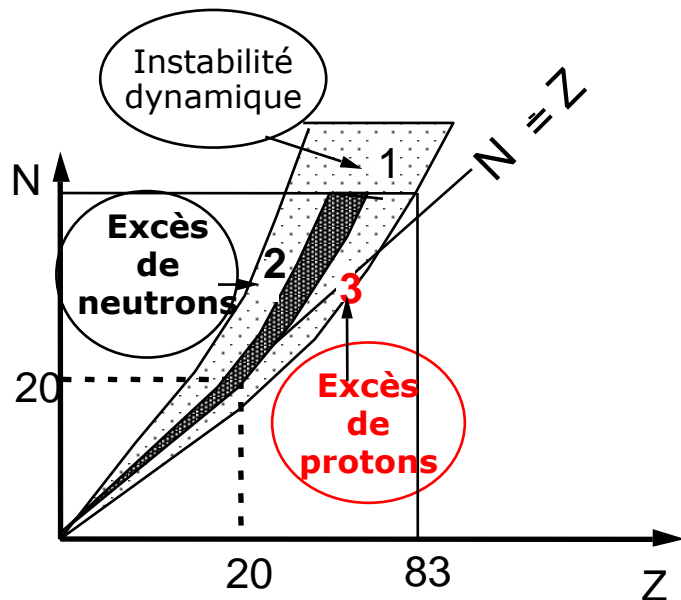


Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Capture électronique

- Réaction au cours de laquelle un noyau riche en protons capture un électron du cortège électronique (couches profondes K ou L) : **zone 3**
- Proton + électron : **neutron**
- Réorganisation du cortège électronique : RX et/ou électrons Auger
- Transformation isobarique ($A = \text{constante}$)



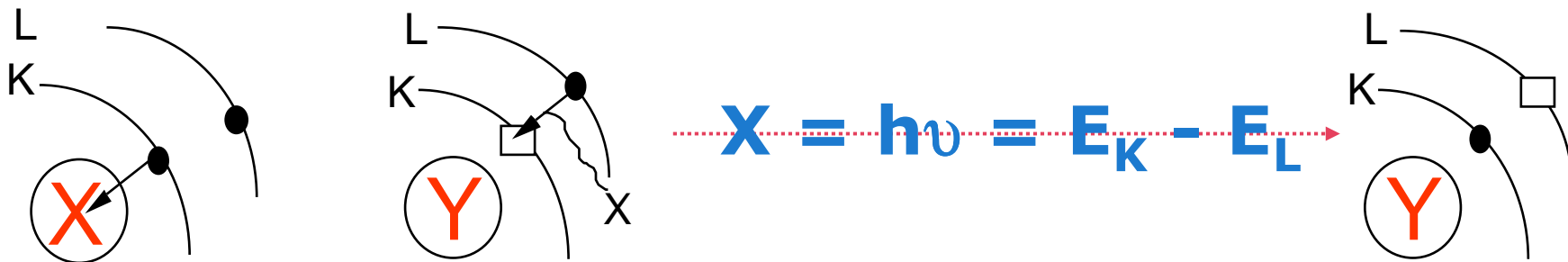
Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Capture électronique

→ Réorganisation du cortège électronique du noyau fils :
RX et/ou électrons Auger

→ Spectre de raies

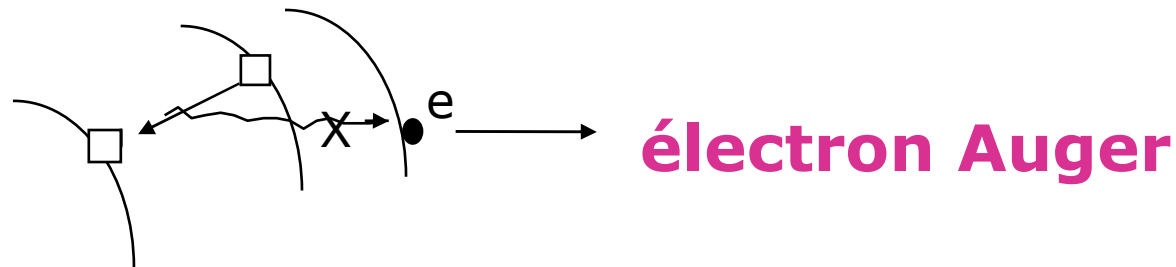


Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Capture électronique

→ Réorganisation du cortège électronique du noyau fils :
RX et/ou électrons Auger

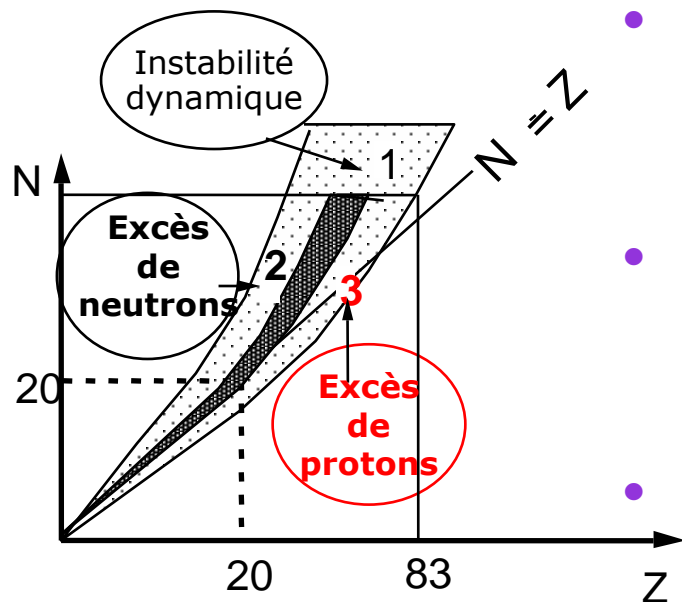


Electron Auger : électron des couches plus périphériques qui va être expulsé....place vacante....place qui va être comblée à son tour.....**fin du processus** : l'atome cible se trouve dans un état ionisé si aucun électron extérieure est venu une place électronique vacante

Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

Les noyaux avec excès de protons peuvent être classés en trois catégories :



- Ceux qui se désintègrent uniquement par émission β^+ (surtout les éléments légers)
- Ceux qui se désintègrent uniquement par capture électronique (CE) (surtout les éléments lourds)
- Ceux qui peuvent se désintégrer soit par émission β^+ soit par CE
 - % de désintégration de chacun des modes (β^+ ou CE) :

Ex: Fluor 18
97% : β^+
3% : CE

⇐ **Masse du noyau radioactif**
⇐ **Energie en excès contenue dans ce noyau**

Modes de transformation du noyau

Désintégration radioactive

- Ceux qui peuvent se désintégrer soit par émission β^+ soit par CE
 - % de désintégration de chacun des modes (β^+ ou CE) :

⇐ **Masse du noyau radioactif**

⇐ **Energie en excès contenue dans ce noyau**

- Plus le noyau est lourd, plus il aura tendance à se désintégrer par CE
- Mais plus l'énergie en excès contenue dans le noyau est importante, plus il aura tendance à se désintégrer par émission β^+
- L'énergie en excès dans le noyau doit avoir une valeur minimale de 1,022 MeV, pour que la désintégration β^+ puisse avoir lieu

Modes de transformation du noyau

Désexcitation radioactive

- Les types de désintégration précédents peuvent exister à l'état pure
 - Passage noyau père au noyau fils s'effectuant en une seule transition
- Ou pas
 - Passage noyau père au noyau fils s'effectuant par des niveaux énergétiques intermédiaires
 - Noyau fils se trouvant, après désintégration, dans un état excité
 - Excédant d'énergie : expulsé sous forme d'un photon γ ou transféré à un électron du cortège électronique qui sera alors expulsé de l'atome (**électron de conversion interne**)

Modes de transformation du noyau

Désexcitation radioactive

Atome fils dans un état excité



$^{95}_{41}\text{Nb}$

$$E_{\beta\text{-max}} = 0,16 \text{ MeV}; I_{\beta\text{-max}} = 99 \%$$

$$E_{\gamma} = 0,77 \text{ MeV}; I_{\gamma} = 99 \%$$

Le retour à un état fondamental peut s'effectuer en passant par plusieurs états excités intermédiaires (60 keV à 3 MeV)

$^{60}_{27}\text{Co}$

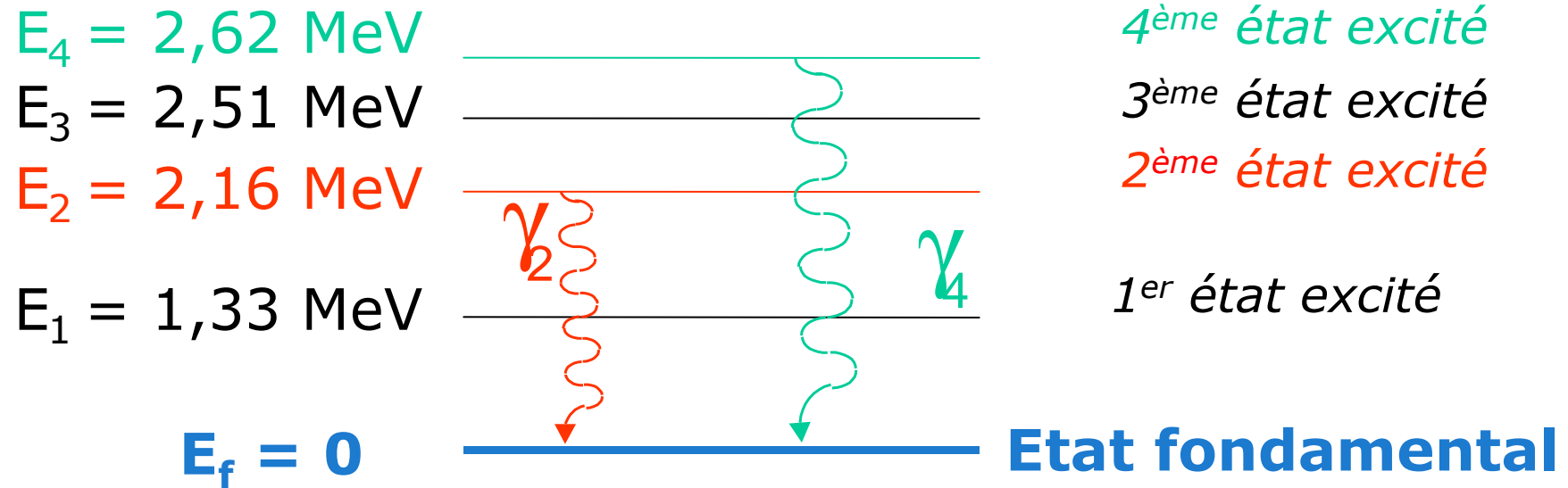
$$E_{\beta\text{-max}} = 0,32 \text{ MeV}; I_{\beta\text{-max}} \approx 100 \%$$

$$E_{\gamma 1} = 1,17 \text{ MeV}; I_{\gamma 1} = 100 \%$$

$$E_{\gamma 2} = 1,33 \text{ MeV}; I_{\gamma 2} = 100 \%$$

Modes de transformation du noyau

Désexcitation radioactive



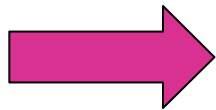
$$E_{\gamma_2} = E_2 - E_f = 2,16 \text{ MeV}$$

$$E_{\gamma_4} = E_4 - E_f = 2,62 \text{ MeV}$$

Modes de transformation du noyau

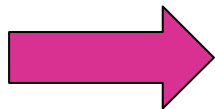
Electrons de conversion interne

Le retour à un état fondamental peut s'effectuer par le transfert de l'excès énergétique à un électron du cortège électronique (le plus souvent du niveau K) qui sera expulsé de l'atome



électron de conversion interne
(en compétition avec l'émission γ)

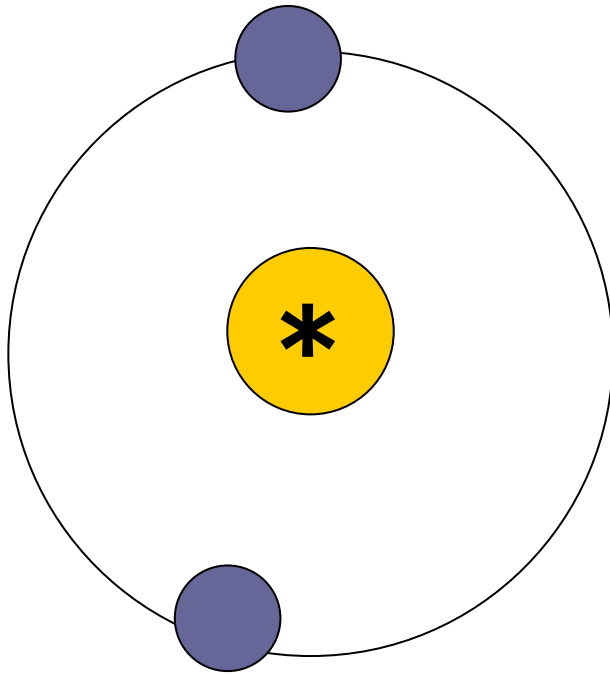
Bilan énergétique : Partage entre l'énergie nécessaire pour libérer l'électron (soit l'énergie de liaison sur la couche) et l'énergie cinétique relative à la vitesse avec laquelle il quitte l'atome



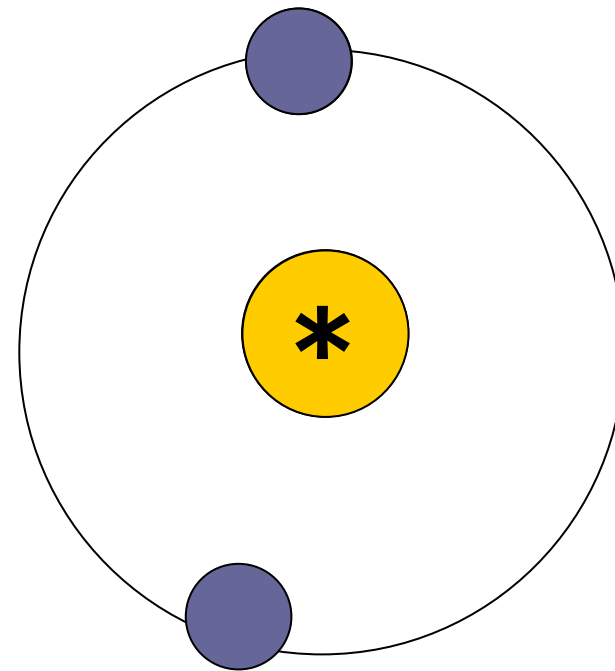
ionisation de l'atome
(en compétition avec l'émission γ)

Modes de transformation du noyau

Electrons de conversion interne



Etat excité



Etat non excité

Modes de transformation du noyau

Désexcitation radioactive

- Rayonnements γ

- Ne se distinguent pas physiquement des RX
- Mais sont généralement plus énergétiques
 - **Plus grande fréquence**
 - **Plus petite longueur d'onde**
- Origine : noyau

- Libération photon γ

- Instantanée : 10^{-16} à 1 sec
 - **atome excité * : X^***
- Isomérique : parfois très longue
 - **atome métastable m : mX**

Modes de transformation du noyau

Désexcitation radioactive

Radionucléides métastables

Le noyau fils ne se désexcite pas instantanément
mais avec une période qui lui est propre



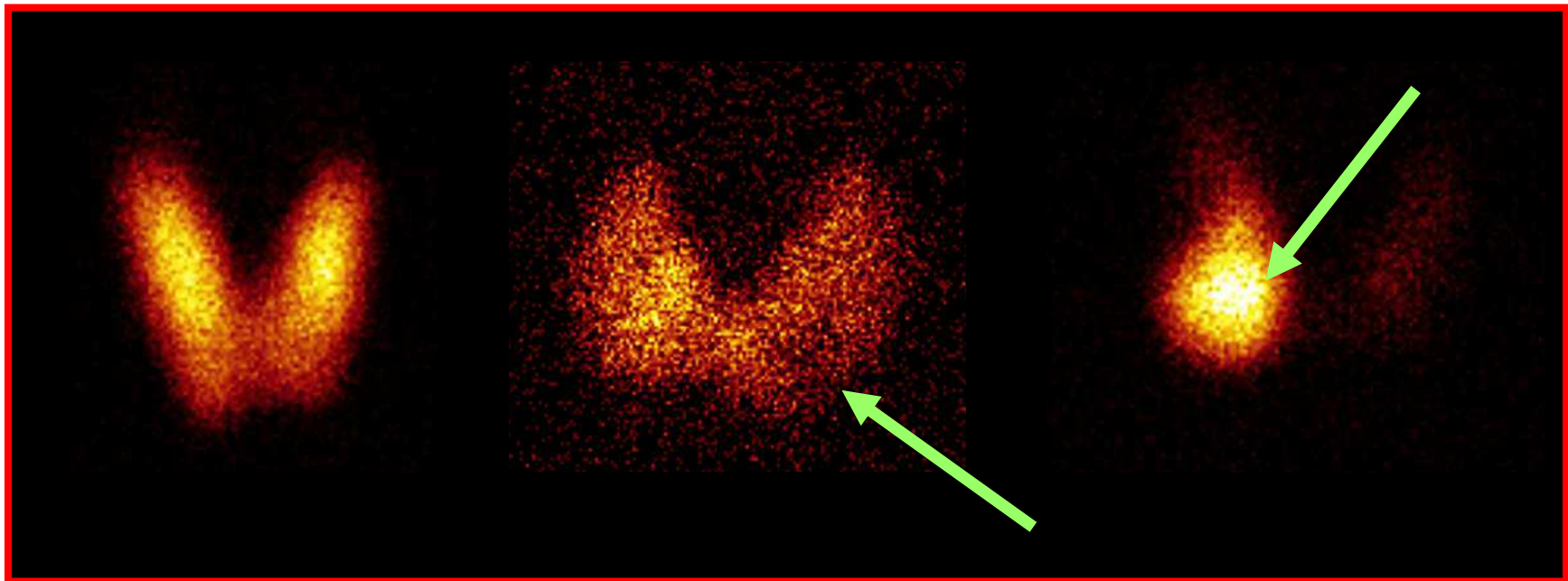
niveaux métastables



T_{1/2} molybdène-99 : 66 H
T_{1/2} technétium-99m : 6 H

Applications médicales des isotopes radioactifs : émetteurs γ

Scintigraphie de la thyroïde avec l'iode-123



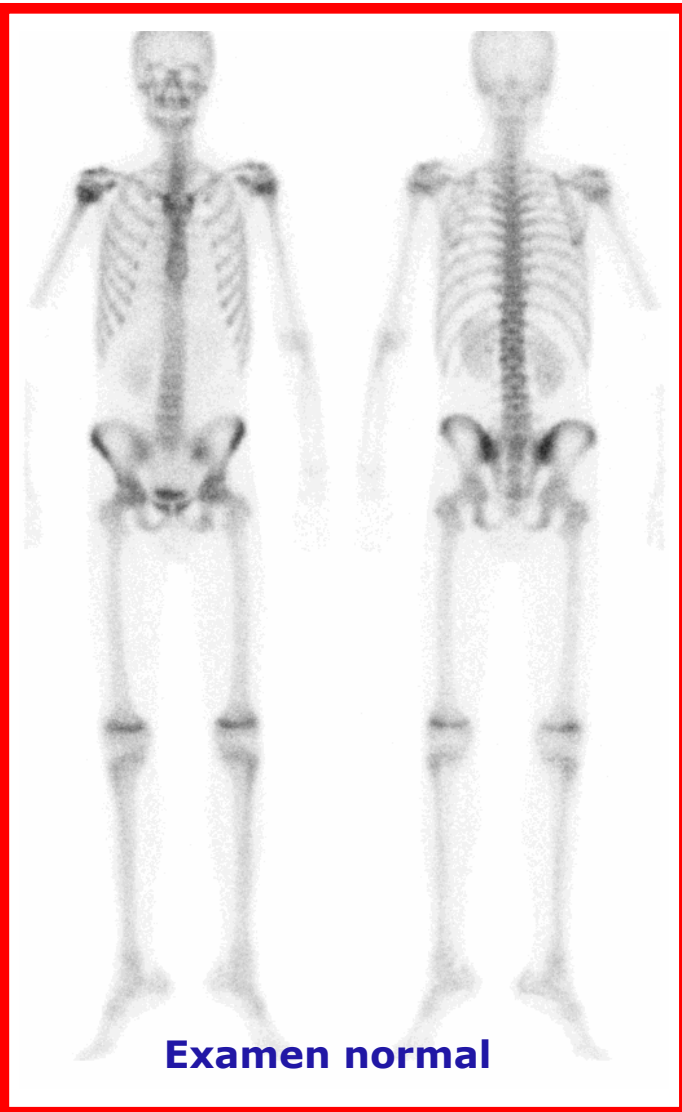
Normal

**Nodule
« froid »**

**Nodule
« chaud »**

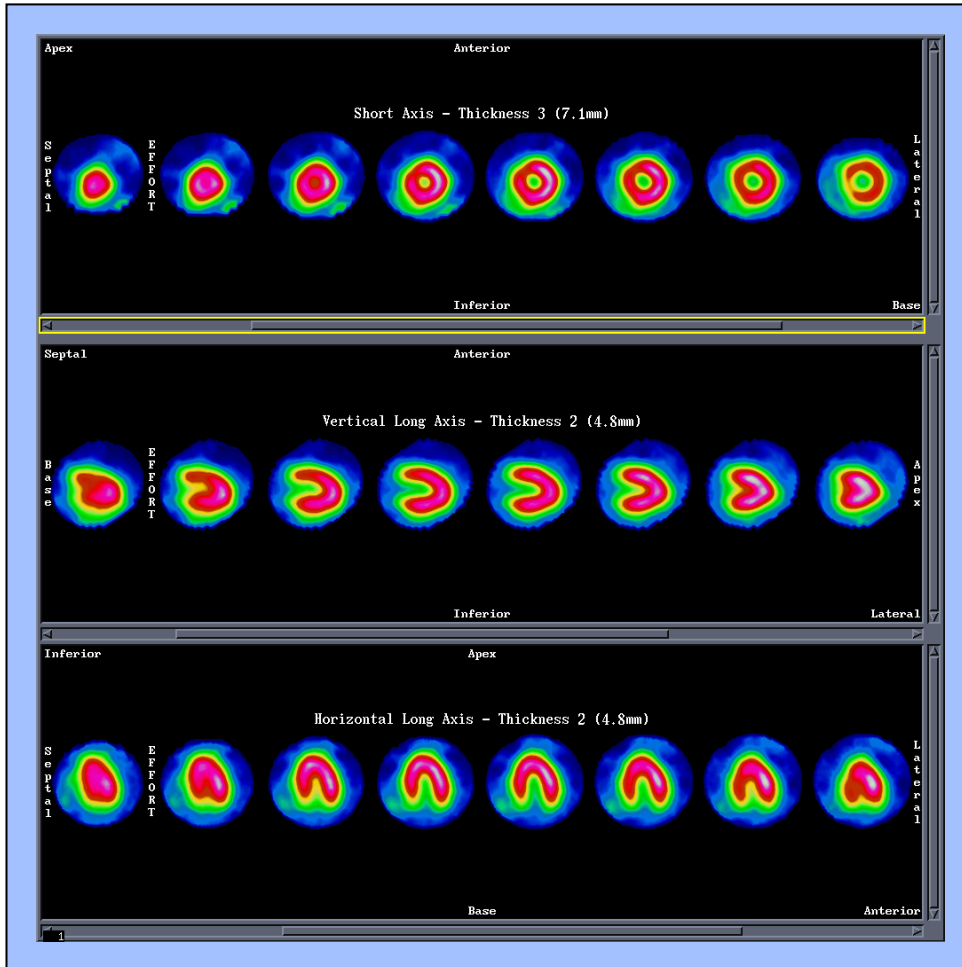
Applications médicales des isotopes radioactifs : émetteurs γ

Scintigraphie osseuse avec du ^{99m}Tc -MDP

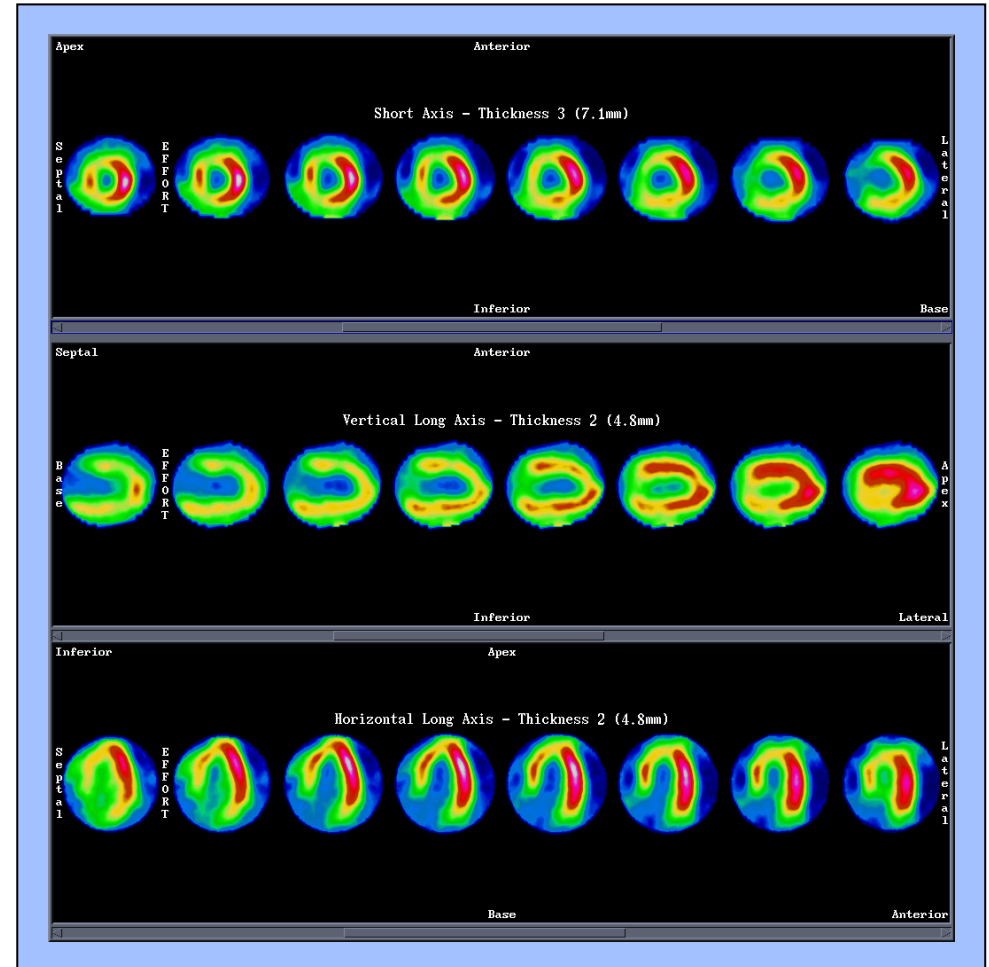


Applications médicales des isotopes radioactifs : émetteurs γ

Scintigraphie myocardique avec du ^{99m}Tc -MIBI



Normal



Nécrose / Ischémie

Modes de transformation du noyau

Résumé

Processus radioactif	Radiations émises	Spectre
α	${}^4\text{He}_2$	raies
β^-	e^-	continu
β^+ ce	e^+ RX $\left\{ \begin{array}{l} e^- \text{ Auger} \end{array} \right.$	continu raies raies
γ	gamma nucléaire	raies

Modes de transformation du noyau

Résumé

Processus radioactif	Radiations émises	Spectre
α	${}^4\text{He}_2$	raies
β^-	e^-	continu
β^+ ce	e^+ RX $\left\{ \begin{array}{l} e^- \text{ Auger} \end{array} \right.$	continu raies raies
γ	gamma nucléaire	raies



Première partie (II)

- **Grandeurs physiques et propriétés fondamentales**
 - **désintégration radioactive**
 - **constante radioactive**
 - **période radioactive**
 - **activité**
 - **taux d'émission**
 - **filiation radioactive**
 - **relation masse - activité**

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Désintégration radioactive

- **Radioactivité** : transformation du noyau à travers l'émission d'un ou plusieurs rayonnements ou particules
 - Désintégration du noyau initial
 - Diminution progressive du nombre de noyaux
 - Vitesse de désintégration caractéristique du noyau
 - Indépendante de l'état physique
 - Indépendante de l'état chimique
 - Indépendante de l'âge
 - Probabilité de désintégration
 - Indépendante du milieu environnant ($^{\circ}\text{T}, \dots$)
 - Indépendante de la présence d'autres radionucléides
 - Phénomène aléatoire

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Désintégration radioactive



$$t_0 \quad N_0 \quad 0$$

$$t \quad N(t) \quad N_0 - N(t)$$

$$v = \frac{d(N_0 - N(t))}{dt}$$

$$v = \lambda N(t)$$

$$v = - \frac{d(N(t))}{dt}$$

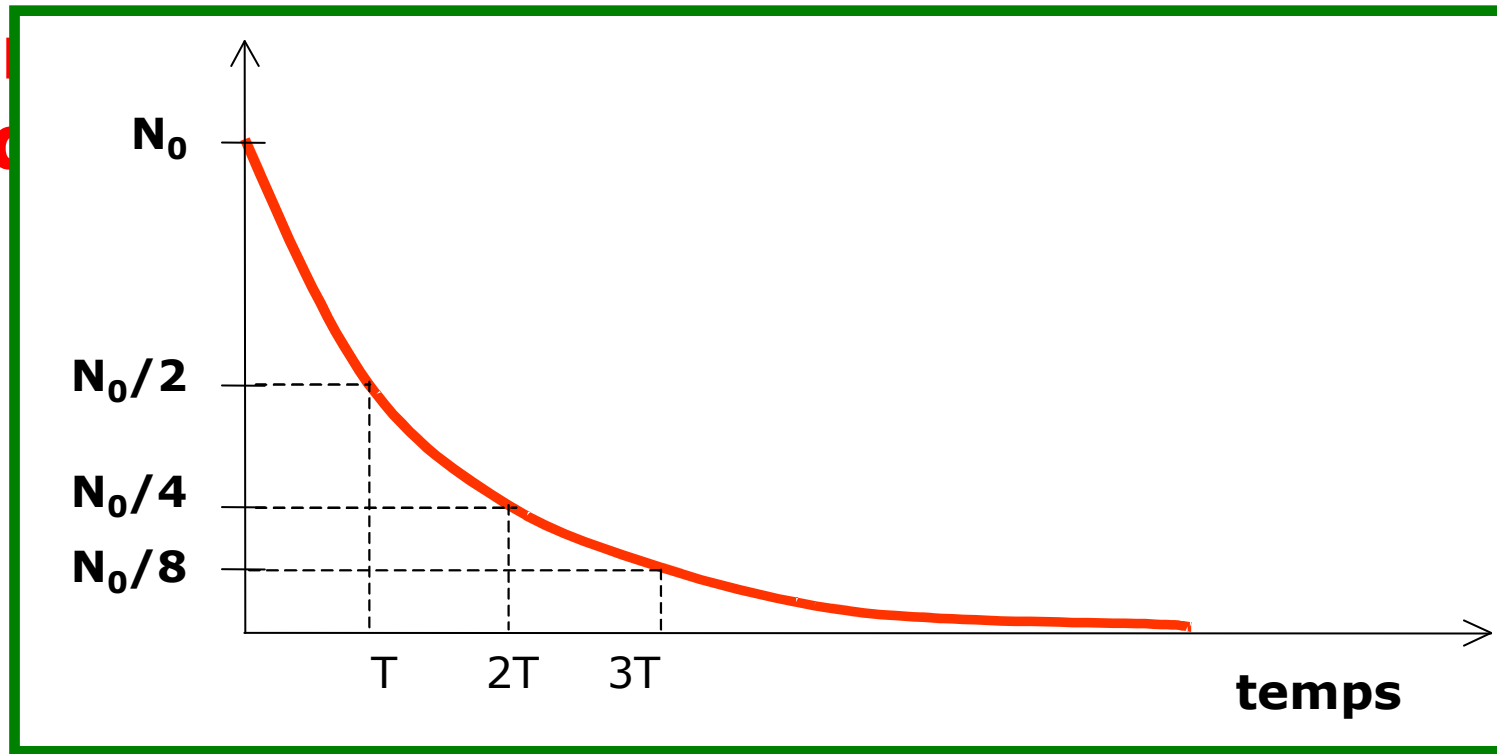
λ (s^{-1}) : **constante radioactive**
qui représente la probabilité
de désintégration par unité de
temps

Grand
fonc

ule

t_0

t



$$v = \frac{d(N_0 - N(t))}{dt} \Leftrightarrow v = - \frac{d(N(t))}{dt} \Leftrightarrow v = \lambda N(t)$$

$$\frac{d(N(t))}{N(t)} = - \lambda dt \Leftrightarrow$$

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

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Période radioactive

- Période radioactive (T) ou demi-vie

- Temps au bout duquel le nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant initial aura diminué de moitié
- Caractéristique d'un isotope radioactif
- De la fraction de secondes à des milliards d'années

^{15}O : T= 2,05 min

^{238}U : T= 4,5 milliards d'années

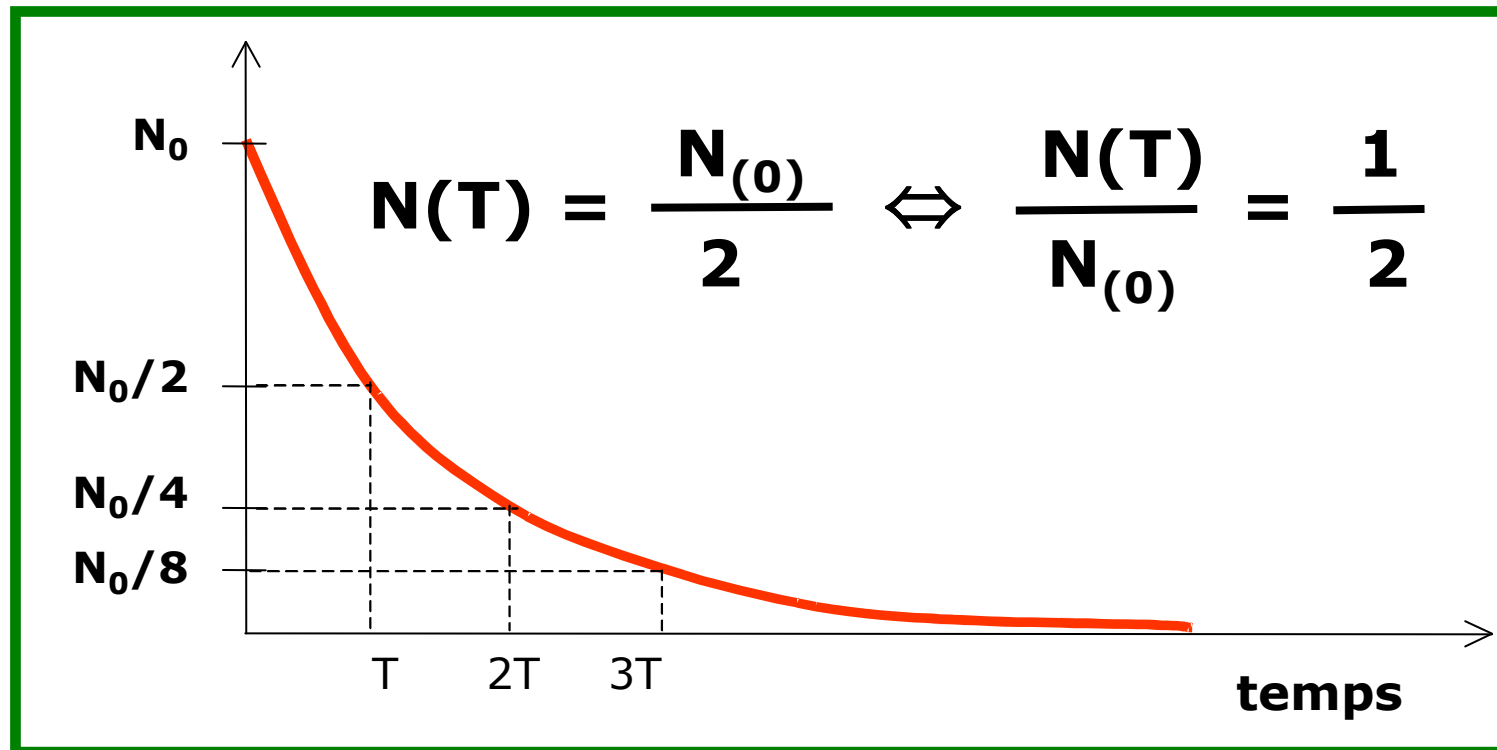
$$N(T) = \frac{N_{(0)}}{2}$$

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

$$\frac{N_{(0)}}{2} = N_0 \times e^{-\lambda T} \Leftrightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \Leftrightarrow T = \frac{\text{Ln } 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Période radioactive



Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Radioéléments naturels à très longue période

Famille	A	1 ^{er} élément période	dernier élément
Thorium	4n	$^{232}_{90}\text{Th}$ $1,4 \times 10^{10}$ ans	$^{208}_{82}\text{Pb}$
Uranium radium	4n+2	$^{238}_{92}\text{U}$ $4,4 \times 10^9$ ans	$^{206}_{82}\text{Pb}$
Uranium actinium	4n+3	$^{235}_{92}\text{U}$ $7,0 \times 10^8$ ans	$^{207}_{82}\text{Pb}$

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Période radioactive

Période effective

- **Période radioactive (T_{phy})**

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

- **Période effective (T_e)**

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_{\text{bio}}} + \frac{1}{T_{\text{phy}}}$$

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Activité

- **Source radioactive** : grand nombre d'atomes qui ne désintègrent pas tous en même temps
- **Activité (A) d'une source radioactive**
 - Nombre de désintégrations par unité de temps (seconde)
 - Unité : becquerel (Bq)

$$A = \lambda \times N = \frac{\ln 2}{T} \times N$$

N : nombre d'atomes radioactifs
T : secondes
 λ : constante radioactive

$$A(t) = A_0 \times e^{-(t/T) \times \ln 2} = A_0 \times e^{-(t/T) \times 0,693}$$

1 Bq = 1 désintégration par seconde

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

- **Activité (A) d'une source radioactive**

→ Nombre de désintégrations par unité de temps (seconde)

$$A = \lambda \times N = \frac{\ln 2}{T} \times N$$

N : nombre d'atomes radioactifs
T : secondes
 λ : constante radioactive

- **Période radioactive (T) ou demi-vie**

→ Temps au bout duquel le nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant initial aura diminué de moitié

Soit A_0 l'activité initiale,

Après $1T$, l'activité résiduelle est égale à $A_1 = A_0/2$

Après $2T$, $A_2 = A_1/2 = A_0/4 = A_0/2^2$

Après n périodes, $A_n = A_0/2^n$

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

- **Activité spécifique**

- Mesure de la radioactivité d'une unité de masse d'une substance
- Ou soit le nombre de désintégrations par unité de temps et par mole d'un composé marqué donné
- Bq/mole



Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Loi de décroissance

Exemple

Source de ^{32}P

$T = 14$ jours

$A_0 = 1$ GBq

A_1 et $A_2 = ?$

$t_1 = 28$ jours

$t_2 = 50$ jours

$$A = A_0 \times e^{-(t/T) \times \ln 2} = A_0 \times e^{-(t/T) \times 0,693}$$

$$A_1 = A_0 / 2^2 = 0,25 \text{ GBq}$$

$$A_2 = 10^9 \times e^{-(50/14) \times 0,693} = 0,084 \text{ GBq}$$

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Taux d'émission



- Taux d'émission (n) d'un rayonnement

→ Nombre de rayonnements d'un type et d'une énergie déterminés émis par unité de temps

→ Unité : s⁻¹

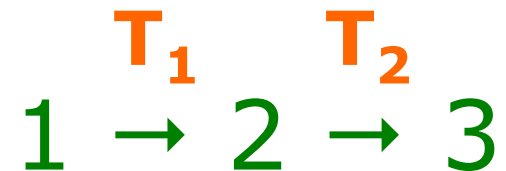
$$n = A \times \frac{I (\%)}{100}$$

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Filiation radioactive

- Filiation radioactive

→ Lorsque le noyau fils est également radioactif



→ Constantes radioactives: père (1) (λ_p) et fils (2) (λ_f)

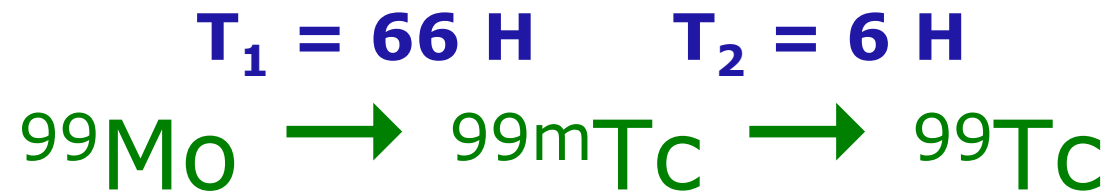
→ L'activité du fils augmente au fur et à mesure que celle du père diminue

→ Mais le fils étant lui-même radioactif, son activité dépend à la fois de T_1 et de sa propre période, T_2

$$A_2 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \times A_{1,0} \times [e^{-(t/T_1) \times \ln 2} - e^{-(t/T_2) \times \ln 2}]$$

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Filiation radioactive Exemple



Relation masse et activité

$$M/N_A$$

masse de chaque atome

$$m = N \times \frac{M}{N_A}$$

$N_A : 6,02 \times 10^{23}$, nombre d'Avogadro

M : masse d'une mole d'atomes

N: n° atomes radioactifs

m : masse en grammes

$$A = \lambda \times N = \frac{\ln 2}{T} \times N$$

N : nombre d'atomes radioactifs

T : secondes

λ : constante radioactive

$$N = \frac{A}{\lambda} = \frac{A \times T}{\ln 2}$$

$$m = \frac{A \times T}{\ln 2} \times \frac{M}{N_A}$$

Radioisotopes utilisés en MN

- **MN** : application médicale des radioéléments en source non scellées à des fins
 - **Diagnostiques**
 - *In vivo* : γ ou β^+ (détection externe : courbes, images..)
 - *In vitro* : γ ou β^- (dosages)
 - **Thérapeutiques β^- ou α**
- **Radioéléments artificiels** : par bombardement de particules dans des accélérateurs de particules ou des réacteurs nucléaires

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Résumé

- **Constante radioactive (λ)** : probabilité pour qu'un atome se désintègre dans l'unité de temps
- **Période radioactive ou demi-vie (T)** : durée de temps nécessaire pour qu'un échantillon de N atomes radioactifs n'en contienne plus que N/2
- **Activité d'une substance radioactive** : nombre moyen de désintégrations radioactives par seconde

Grandeurs physiques et propriétés fondamentales

Résumé



- **Constante radioactive (λ)** : probabilité pour qu'un atome se désintègre dans l'unité de temps
- **Période radioactive ou demi-vie (T)** : durée de temps nécessaire pour qu'un échantillon de N atomes radioactifs n'en contienne plus que N/2
- **Activité d'une substance radioactive** : nombre moyen de désintégrations radioactives par seconde