

# ***Biophysique des rayonnements ionisants (RI)***

***Pr. Malika ÇAOUI***

***Service de Médecine Nucléaire CHU International Cheikh Zaid  
Faculté de Médecine et de Pharmacie - Laboratoire de Biophysique  
Université Mohamed V - Rabat-***

# Objectifs du cours

## Objectifs généraux :

- Acquérir des notions de base sur les rayonnements ionisants (RI) et non ionisants
- Avoir une vision globale de l'application des RI en milieu médical
- Sensibiliser aux notions fondamentales de radioprotection

## Objectifs spécifiques:

- Distinguer les catégories de rayonnements directement et indirectement ionisants
- Décrire les différents types d'interaction des RI avec la matière
- Définir les différents moyens utilisés pour leur détection et leur mesure
- Maîtriser l'impact des RI sur les milieux biologiques
- Mesurer les conséquences des désordres engendrés par les RI sur le corps humain
- Comprendre les règles de radioprotection de base

# Définition des RI

- Un rayonnement est **ionisant** lorsque son énergie est suffisante pour lui permettre **d'arracher un électron de la matière** : c'est le phénomène d'ionisation avec formation d'une paire d'ions:
  - *l'ion positif constitué par l'atome privé d'un électron*
  - *l'ion négatif est formé par l'électron éjecté.*
- Si cette énergie est insuffisante, elle va servir seulement à déplacer un électron vers une orbite plus externe. L'atome devient instable : état excité.
- Il redevient stable en rayonnant sous forme électromagnétique son excès d'énergie : c'est le phénomène d'émission

# **Pourquoi utilise-t-on les Rayonnements Ionisants (RI) en médecine ?**

# ≈ 70% des RI sont utilisés en milieu médical

Dans un but diagnostique: les RI sont parfois nécessaires pour établir un diagnostic

## 1- Radiologie: imagerie par atténuation

- **Standard:** radio du thorax, de la main, de l'abdomen.. Performances sont améliorées:
  - Avec produit de contraste: artériographie, TOGD, ...
  - numérisée : image de meilleure qualité obtenue avec des doses de RX plus faibles
- **La Tomodensitométrie (TDM) ou Scanner :** tube à rayon X qui tourne autour du patient

## 2- Médecine nucléaire: imagerie par émission :

on administre un produit radioactif et on apprécie sa fixation au niveau d'un organe ou structure: scintigraphies osseuse, du myocarde, de la thyroïde; du rein; du poumon...

Dans un but thérapeutique: pour traiter des cancers, on associe les RI sous forme de:

- **sources de RI scellées :** radiothérapie, radiologie interventionnelle
- **sources non scellées:** radiothérapie métabolique: iode 131 traite pathologies de thyroïde

# Structure de l'atome

**Matière:** solide, liquide ou gaz assemblage de molécules de taille , de forme et de composition diverses

**Atome:** Élément chimique qui forme la plus petite quantité de matière.

L'atome est constitué de **particules élémentaires**: nucléons et électrons.

- **Le Noyau:**
  - Diamètre noyau  $\approx 10^{-14}$  m 10 000 fois plus petit que celui de l'atome
  - Nucléons: somme des Neutrons (N) et des Protons (Z)
- **Le cortège électronique :** Les électrons (é) occupent un volume plus grand (diamètre  $10^{-10}$  m) et gravitent autour du noyau

# Le Noyau

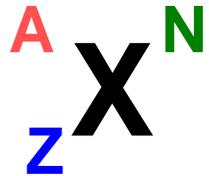
## Nucléons:

- Somme du nombre de neutrons et de protons : **nombre de masse : A**
- **Protons (p) : Z** Charge élémentaire positive:  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C (Coulomb)
- **Neutrons(n): N** particules neutres sans charge
- **Masse (m) :  $m_p \approx m_n \approx 1,67 \cdot 10^{-24}$  g =  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg ;**
- **Nombre Z protons : c'est le nombre atomique**
  - Caractérise la charge totale  $Z_e$  du noyau,
  - **caractéristique** d'un élément chimique de la table périodique de Mendeleïev

# *Le cortège électronique*

- Masse é au repos:  $0,9 \cdot 10^{-27} \text{g}$  : **1800 + faible / masse du nucléon**
- Électron: charge élémentaire négative:  $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$  (Coulomb)
- Nombre d'électrons de l'atome varie selon Z: **Numéro atomique**
- L'électron est l'agent des réactions chimiques
- Atome : « **édifice** » *électriquement neutre* où:
  - Z électrons = Z protons
  - Masse atome  $\approx$  masse noyau

# Représentation



**X**: Symbole chimique de l'élément (Na; K; Cl; Fe, Zn..)

$$N = A - Z$$

**A**: Nombre de Nucléons (neutrons+protons)

- **A** : nombre de masse =  $N+Z$
- **Z**: Nombre de protons donc d'é = Numéro Atomique
- **N**: neutrons (ne figure pas toujours)



6é (-6xé ); 6n; 6p(+ 6xé)



39é (89- 39 )n; 39p

# Isotopes

**Eléments : mêmes propriétés chimiques :**

**Z constant mais A  $\neq$  donc N  $\neq$**

**L'Hydrogène :**



Hydrogène

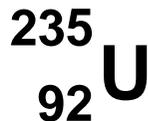
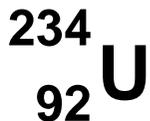


Deutérium



Tritium\*

**L'Uranium Naturel : trois Isotopes radio-actifs :**

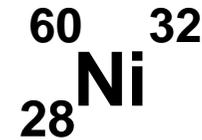
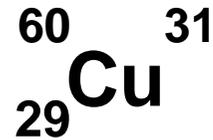
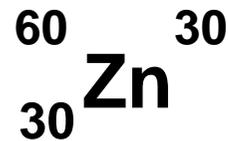


Le carbone 14:  ${}^{14}_6\text{C}$

Le carbone 12:  ${}^{12}_6\text{C}$

# Isobares - Isotone - Isomères

**Isobares** : A = constant et Z ≠



Les transformations spontanées conservant A : isobariques.

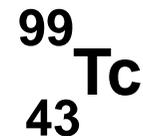
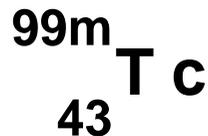
**Isotones** : N = constant et Z ≠

N= 28 ( ${}^{52}\text{Cr}$ ;  ${}^{54}\text{Fe}$ ...);

N=50 ( ${}^{86}\text{Kr}$ ,  ${}^{87}\text{Rb}$ ,...)

N=82 ( ${}^{136}\text{Xe}$ ;  ${}^{138}\text{Ba}$ ...)

**Isomères** : noyaux identiques mais états d'énergies différentes



# Théorie de la relativité

**Relativité Einstein 1905** : cette théorie permet de relier la masse et l'énergie par la relation d'équivalence masse-énergie :

A toute particule au repos de masse  $m_0 \rightarrow$  énergie de masse :  $E = m_0 c^2$

Lorsque cette particule se déplace à grande vitesse, sa masse varie avec la vitesse, l'énergie totale de la particule est:

$$E = m_0 c^2 + T = m c^2$$

- $c$  : célérité ou vitesse de la lumière  $= 3 \cdot 10^8$  m/s
- $m_0$  : masse au repos de la particule;  $m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$  avec  $\beta = v/c$
- $m_0 c^2$  : énergie de la particule au repos
- $T$  : énergie cinétique:  $E_{\text{cin}}$

# Conservation des paramètres

**Principes fondamentaux : lors d'une transformation radioactive il y a conservation des paramètres suivants:**

- **Conservation de la charge et du nombre de nucléons : qui restent les mêmes entre l'état initial et l'état final**
- **Conservation de l'énergie totale  $E$  et de l'impulsion du système:**
  - **Énergie totale :  $E = m c^2$**
  - **l'impulsion :  $\vec{p} = m\vec{v}$  (voir plus loin)**

# *Dualité onde - corpuscule*

**Einstein (1905):** émet l'hypothèse qu'à toute onde (ou rayonnement) électromagnétique doit être associée un corpuscule, appelé photon, possédant une énergie quantifiée :  $E = h\nu$  avec

- $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$  : constante de Planck
- $\nu = c / \lambda$  ;  $\nu$  : fréquence du rayonnement
- $\lambda$  : longueur d'onde

**Louis de Broglie (1924) :** « suggère que toute particule , électron, doit être transportée par une onde dans laquelle elle est incorporée »

**Un rayonnement ou une radiation** est un mode de propagation de l'énergie dans l'espace, sous forme d'onde ou de particules. Ce rayonnement peut être chargé ou non, avoir une masse au repos ou non.

# *Photon ou rayonnement électromagnétique*

- Photon: sans existence au repos et sans support matériel
- Il est assimilé à une particule d'énergie cinétique :  $E = h \nu$
- Il est caractérisé par son énergie:  $E = m c^2 = h \nu = hc / \lambda$
- Soit  $m = h / \lambda c$  ou  $\lambda = h / mc$
- A toute particule de masse  $m$  et de vitesse  $v$  est associée une onde dont la longueur d'onde  $\lambda$  :

$$\lambda = h / mv = h / p \quad \text{et} \quad \lambda = c / \nu$$

# UNITES

## Longueur

- En physique nucléaire : fermi ;  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ .
- En physique atomique : angström ;  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ .

## Temps

- Echelle très étendue de secondes  $\rightarrow$  milliards d'années.
- On utilise : seconde; minute; heure; jour ; année.

## Energie:

- L'unité : *l'électron-volt (eV)* : c'est l'énergie acquise par une charge élémentaire e- soumise à une différence de potentiel de **1 volt**:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

- En physique nucléaire : KeV ; MeV

# Masse et Unité de masse: u.m.a.

Masse (Atome) =  $M$  (noyau) +  $m$  Zé

- Une mole d'atomes :  $N$  atomes
- $N$  : nombre d'Avogadro =  $6,02 \cdot 10^{23}$  atomes

- Ex : -  $N$  atomes d'O<sub>2</sub> pèsent 16g  
-  $N$  atomes de C pèsent 12 g
- Masse Molaire
- 

- Masse de  $N$  atomes C  $\longrightarrow$  12 g

- Masse de 1 atome C  $\longrightarrow$   $12 / N$

# Unité de Masse Atomique: u.m.a.

Par définition : c'est le **1 / 12 de la masse de  $^{12}\text{C}$**

$$\square 1 \text{ u.m.a} = 1 / 12 \times 12 / N = 1,660565 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

$$\square E = m c^2 ; C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\square E = 1,66 \cdot 10^{-27} \times (3 \cdot 10^8)^2 = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$\square \text{ Unité d'énergie physique nucléaire: } eV \text{ et } 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\square E = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$\square 1 \text{ u.m.a} = 1,5 \cdot 10^{-10} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 931 \cdot 10^6 \text{ eV} / c^2$$

$$\square 1 \text{ u.m.a} = 931 \text{ MeV} / c^2 \text{ ou } 1 \text{ u.m.a} \approx 931 \text{ MeV}$$

# *Masses des nucléons*

- ❖  $m_n = 1,00866 \text{ u.m.a} \approx 939,55 \text{ MeV}$
- ❖  $m_p = 1,00727 \text{ u.m.a} \approx 938,256 \text{ MeV}$
- ❖  $m_n - m_p = 0,00139 \text{ u.m.a} \approx 1,294 \text{ MeV}$
- ❖ *A retenir* :  $m_e = 0,511 \text{ MeV} \approx 511 \text{ KeV}$

# Défaut de masse

- La masse du noyau est toujours inférieure à la somme des masses des protons et des neutrons.
- Cette différence s'appelle défaut de masse:  $\Delta M$  dont l'énergie  $B = \Delta M C^2$
- $M(A,Z)C^2 = [Z m_p + N m_n] C^2 - \Delta M C^2$
- $\Delta M C^2 = [Z m_p + N m_n] C^2 - M(A,Z) C^2$
- $B$ : c'est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le séparer en ses constituants
- Les réactions nucléaires exploitent « ce défaut de masse »:

# ANNEXE

Rapport	Préfixe	Symbole
$10^{12}$	Tera	T
$10^9$	Giga	G
$10^6$	Méga	M
$10^3$	Kilo	K
$10^{-3}$	milli	m
$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-15}$	femto (fermi)	f
$10^{-18}$	atto	a



# Radioactivité

- La radioactivité est un phénomène *spontané ou aléatoire*
- Origine : l'instabilité de la structure du noyau.
- Le noyau instable émet de façon spontanée, un rayonnement : il s'agit d'une *transformation radioactive*.
- La stabilité nucléaire, cas de la plupart des éléments naturels, dépend de l'équilibre entre neutrons et protons qui composent le noyau.
- Le nombre des nucléides naturels présents sur la Terre stables et radioactifs est de  $\approx 325$  :
  - 274 : stables
  - $\approx 51$  instables : radio éléments naturels
- Les réactions nucléaires dans les centres atomiques produisent des de nombreux radio-éléments artificiels

# ***Historique sur la radioactivité***

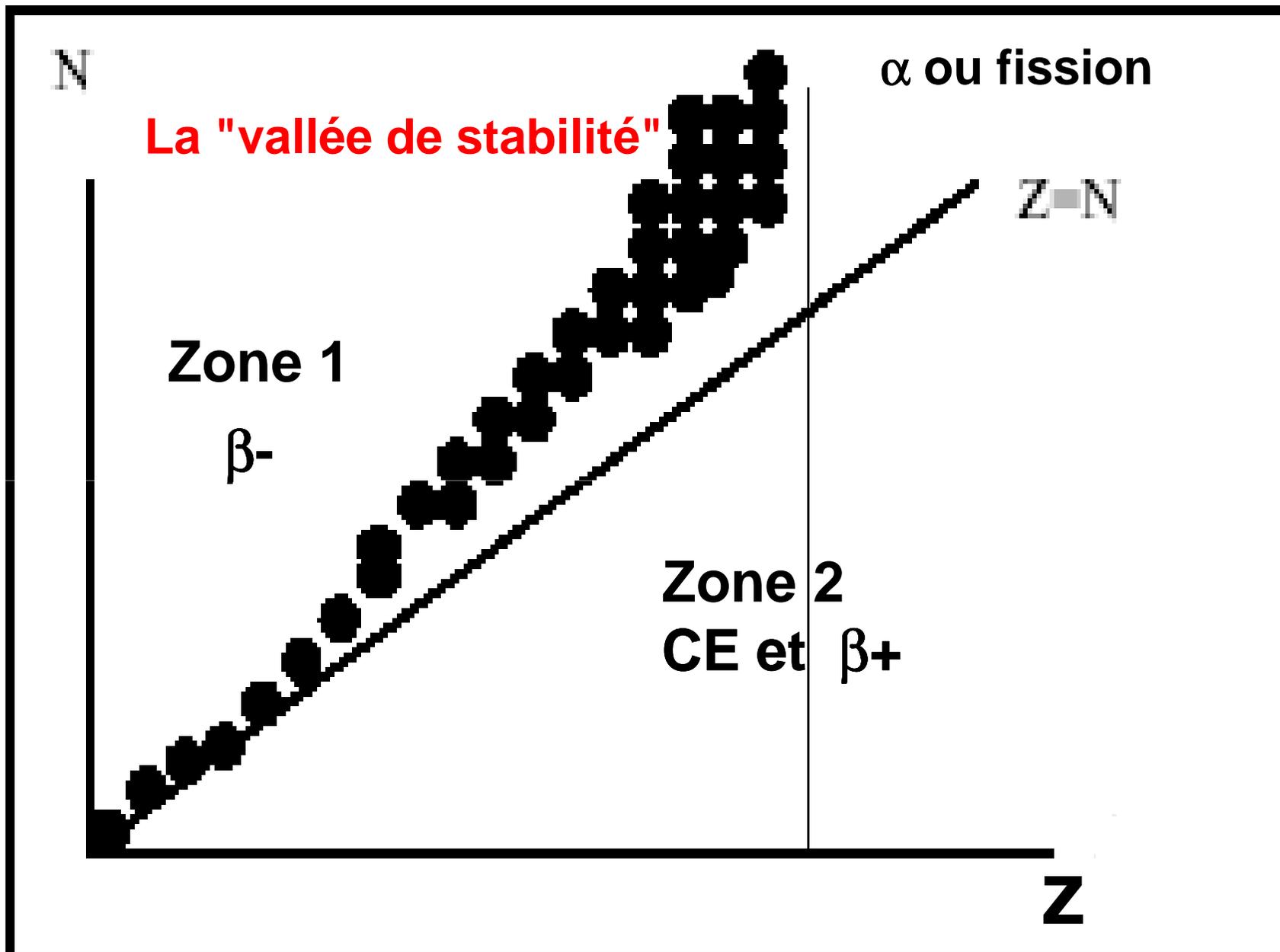
***Röntgen: en 1895 découvre les Rayons X***

***Henri Becquerel :***

- ***Radioactivité: découverte en 1896 par Becquerel, qui travaillait sur le rayonnement X, que Röntgen avait découvert par hasard***
- ***Il observa que des sels d'uranium impressionnaient à l'obscurité une plaque photographique;***
- ***Il en conclut : l'uranium émettait un rayonnement***

***Pierre et Marie Curie:***

- ***Poursuivent ensemble les travaux sur la radioactivité naturelle découverte en 1896 par Henri Becquerel, à partir d'un sel d'uranium***
- ***En 1898 appelèrent ce phénomène **Radioactivité*****



*Diagramme de Segré*

# Courbe de stabilité

*On distingue 3 zones d'instabilité nucléaire*

- **Zone 1** : Excès de N : désintégration  $\beta^-$
- **Zone 2** : Excès de Z : désintégration  $\beta^+$  et capture électronique ( CE )
- **Zone 3** : Excès Z + N située au delà de La « vallée de stabilité » (VS)  
où les noyaux sont volumineux : ( désintégrations  $\alpha$  et fission )
- Jusqu'à Z = 20 : la VS se situe : 1ère diagonale où N = Z
- Pour des valeurs Z > 20, la VS s'écarte de la diagonale, la stabilité du noyau n'est assurée que si N > Z (  $\approx 1,5$  fois plus )
- L'excès de N contrebalance les forces de répulsion coulombiennes des protons qui tendent à diminuer la stabilité du noyau,

# Transformations radioactives

- Le noyau instable tend à évoluer vers un état stable, en émettant de façon spontanée, un rayonnement : *transformation radioactive*.
- Cette transformation est de deux types:
- 1/ Excès de nucléons : aboutit à une *désintégration*, dans ce cas:
  - le nombre de protons change, donc le numéro atomique  $Z \neq$
  - on obtient un *élément chimique différent* de l'élément de départ
- 2/ Excès d'énergie: aboutit à une *désexcitation sans changement de Z*
  - *l'élément d'arrivée est le même que l'élément de départ*
  - Ce type de radioactivité succède au premier type

# Deux types de radioactivité

## 1/ Excès de nucléons:

*Transformation radioactive est une désintégration:*

- **Globale :** particules alpha:  $\alpha : {}^4_2\text{He}$  ( noyau d'Hélium)
- **Neutron :**  $n \longrightarrow p + e^-$  : émission ( $\beta^-$ )
- **Proton :** deux possibilités de transformations :
  - $p \longrightarrow n + e^+$  : émission ( $\beta^+$ )
  - $e^- + p \longrightarrow n$  : CE : « *capture électronique* »

# Deux types de radioactivité

## 2/ Excès d'énergie :

- Après une désintégration le noyau reste souvent « excité »
- *Transformation radioactive* : **désexcitation ou transition**
  - **conversion interne**: l'énergie est communiquée à un  $e^-$  qui sera éjecté
  - **radioactivité gamma  $\gamma$**  : énergie émise sous forme d'un photon d'origine nucléaire
  - **Production de paire interne ( $e^+$ ,  $e^-$ )**

# Emission $\beta^-$

- Cause : excès de neutrons
- mécanisme : n excédentaire



- Emission : - d'un Rayonnement  $\beta^-$  ( $e^-$ )
  - d'un anti-neutrino:  $\bar{\nu}$  particule neutre;  $m\bar{\nu} \approx 0$
- $e^-$  et  $\bar{\nu}$  ne sont pas des composants du noyau donc sont éjectés : rayonnements nucléaires émis
- $\bar{\nu}$  : indétectable par les moyens conventionnels
- $e^-$  : observable : nommé =  $\beta^-$

# Emission $\beta^-$

## Lois de conservation



$$\text{Charge : } Z \qquad Z + 1 + (-1) + 0$$

$$\text{Baryons : } A \qquad A + 0 + 0$$

$$\text{Leptons : } 0 \qquad 0 \qquad (+1) + (-1)$$

- Conservation de : Charge électrique, Energie; Quantité de mouvement
- $Q_{\beta^-} = E_{\beta^- \text{ Max}} = E_i - E_f$
- $E_{\beta^-}$  : bilan énergétique de  $\beta^-$

Conditions : Emission  $\beta^-$  possible si :

➤  $M(A, Z) > M(A, Z+1) + m_e + m_{\bar{\nu}}$  (or  $m_{\bar{\nu}} \approx 0$ )

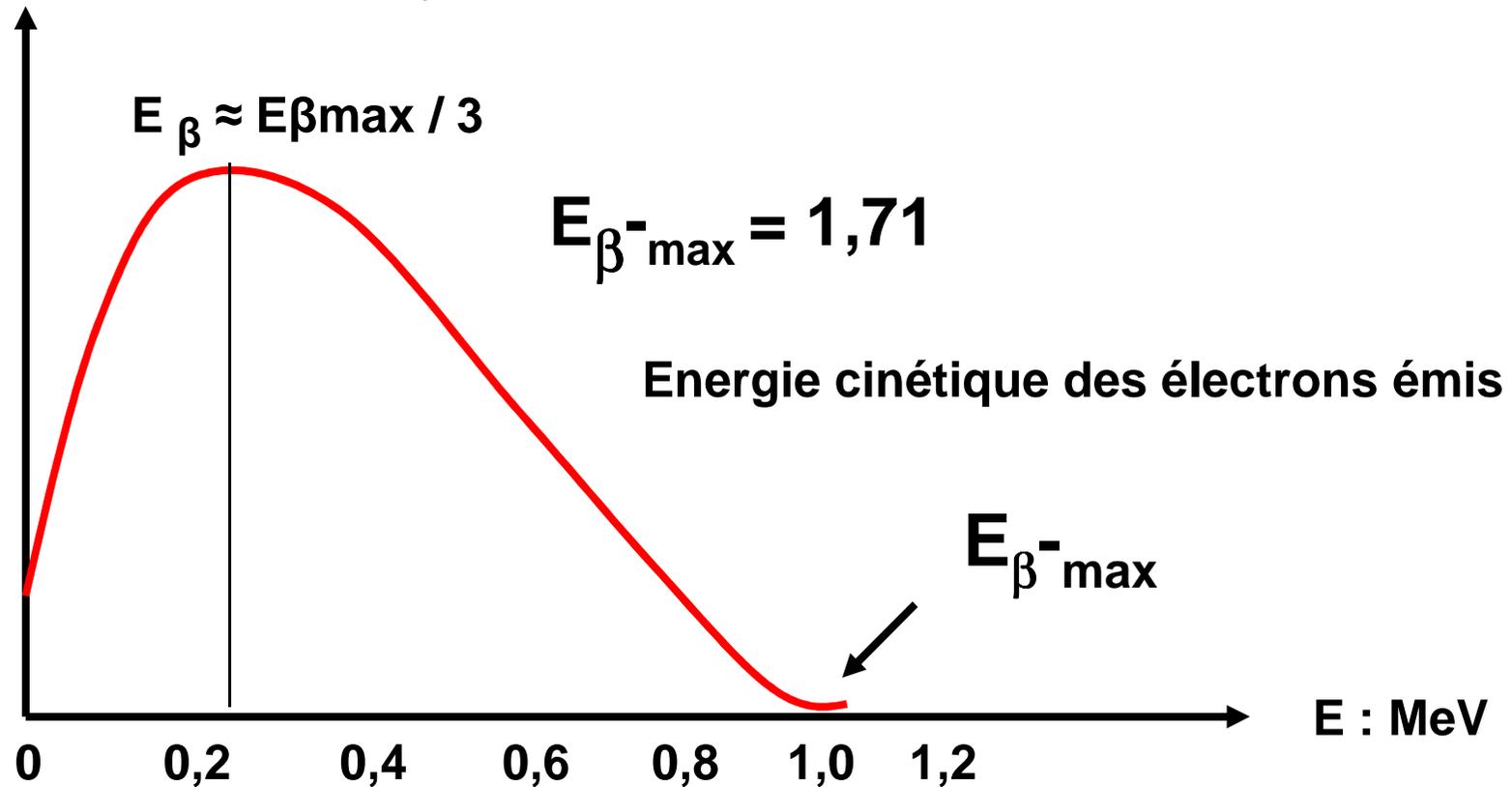
# Emission $\beta^-$

- $E_{\beta^- \text{ Max}} = [ M ( A , Z ) - ( M ( A , Z+1 ) + m e^- ) ] C^2$
- $M ( A , Z ) = M ( A , Z ) - Z m e^-$  ;
- $M ( A , Z+1 ) = M ( A , Z+1 ) - ( Z+1 ) m e^-$
- $E_{\beta^- \text{ Max}} = [ M ( A , Z ) - M ( A , Z+1 ) ] C^2 > 0$  ;
- $E_{\beta^- \text{ Max}} > 0$
- $Q_{\beta^-} = E_{e^-} + E_{\bar{\nu}} + E_R$  (or  $E_R \approx 0$ )
- $Q_{\beta^-}$  : énergie libérée partagée au hasard :  $e^-$  et  $\bar{\nu}$

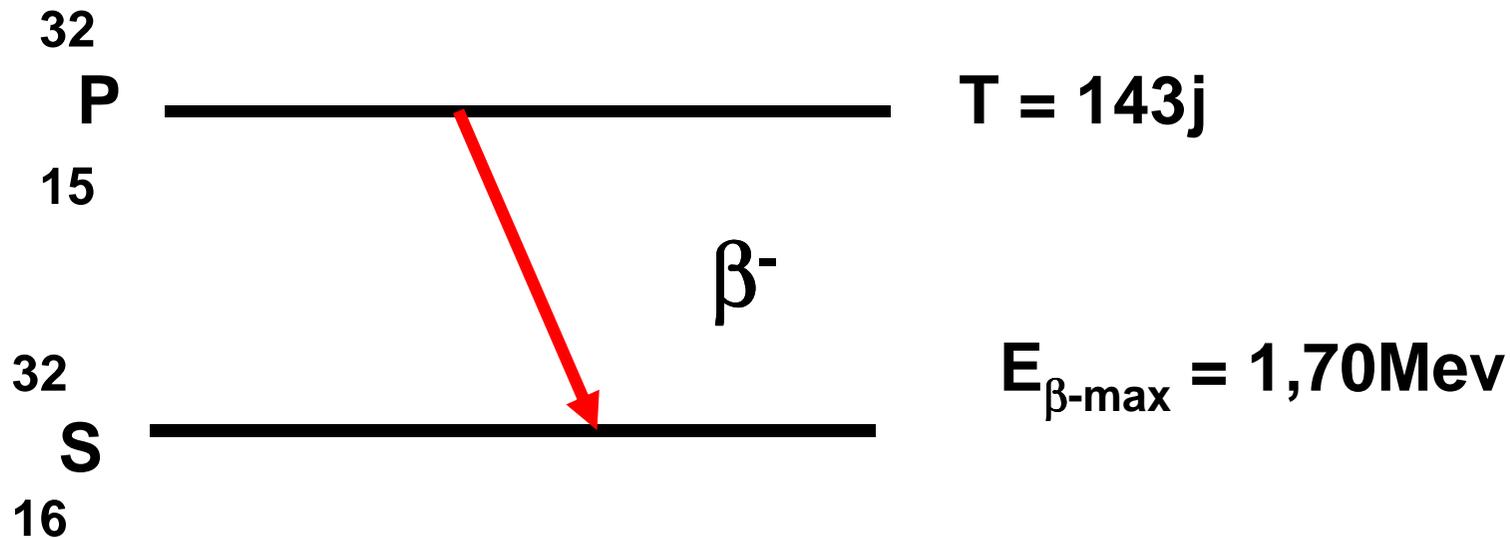
# Spectre $\beta^-$

- **Spectre continu :**
  - depuis  $E_{e^-} = 0$  car  $Q_{\beta^-} = E \bar{\nu}$
  - jusqu'à :  $Q_{\beta^-} = E_{e^- \text{ max}} ; E \bar{\nu} = 0$
  - $E_{\beta^- \text{ max}} = 10\text{KeV} \longrightarrow 3\text{Mev}$

dN/dE



# Exemples $\beta^-$



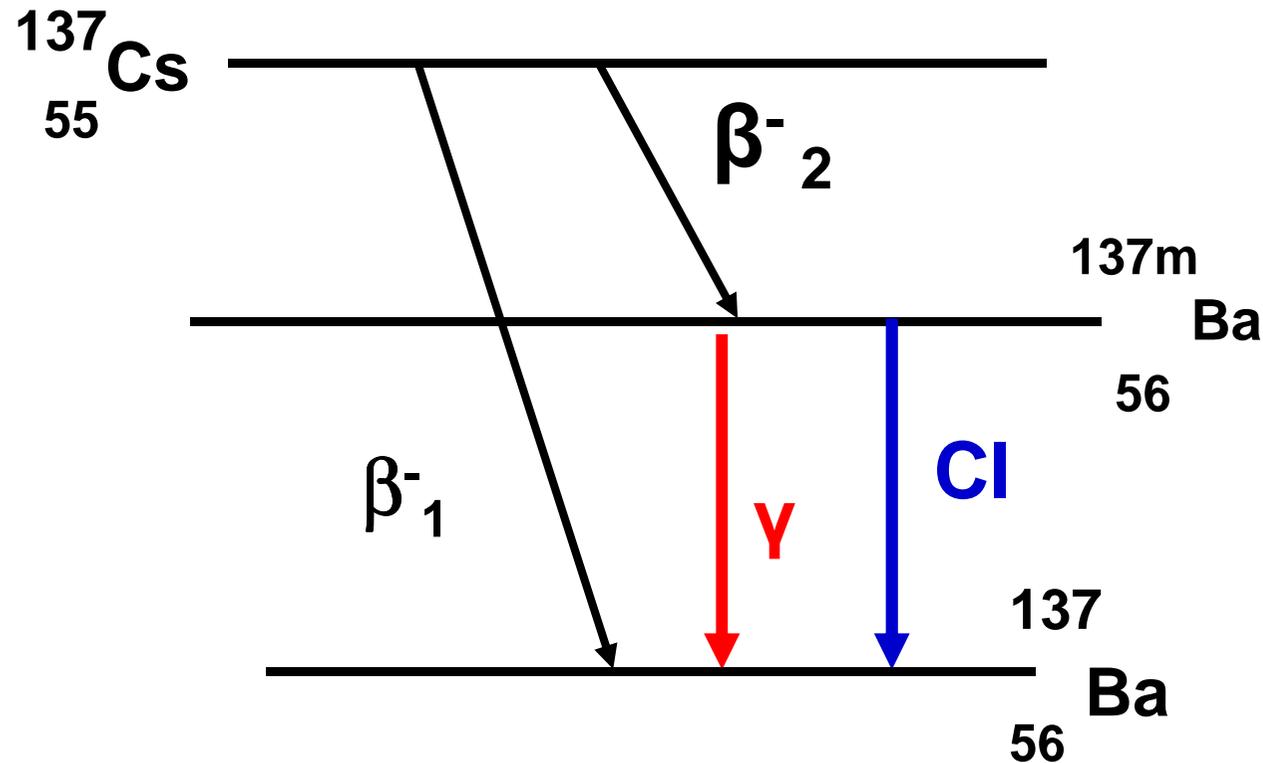
$$M_{15}^{32}\text{P} = 31,98403 \text{ u.m.a}$$

$$M_{16}^{32}\text{S} = 31,98220 \text{ u.m.a}$$

---


$$\Delta M = 0,00183 \text{ u.m.a}$$

- $Q_{\beta^-} = E_{\beta^- \text{max}} = 931 \times 0,00183 = 1,70 \text{ MeV}$
- $I_{\beta^-} = 100\%$       P «émetteur Pur »



$$E_{\beta_1^- \text{max}} = 1,17 \text{ MeV} ; I_{\beta_1^-} = 7\%$$

$$E_{\beta_2^- \text{max}} = 0,51 \text{ MeV} ; I_{\beta_2^-} = 93\%$$

# Emission $\beta^+$

- cause : excès de protons
- Mécanisme :



- Emission d'un positon (ou positron) = électron positif par le noyau ( rayonnement  $\beta^+$  ) et d'un neutrino  $\nu$ .
- $e^+$  et  $\nu$  : ne sont pas des composants du noyau d'où sont éjectés : rayonnements nucléaires émis:
- Positon détectable ( $\beta^+$ ) et  $\nu$  : « fantôme » indétectable

# Emission $\beta^+$

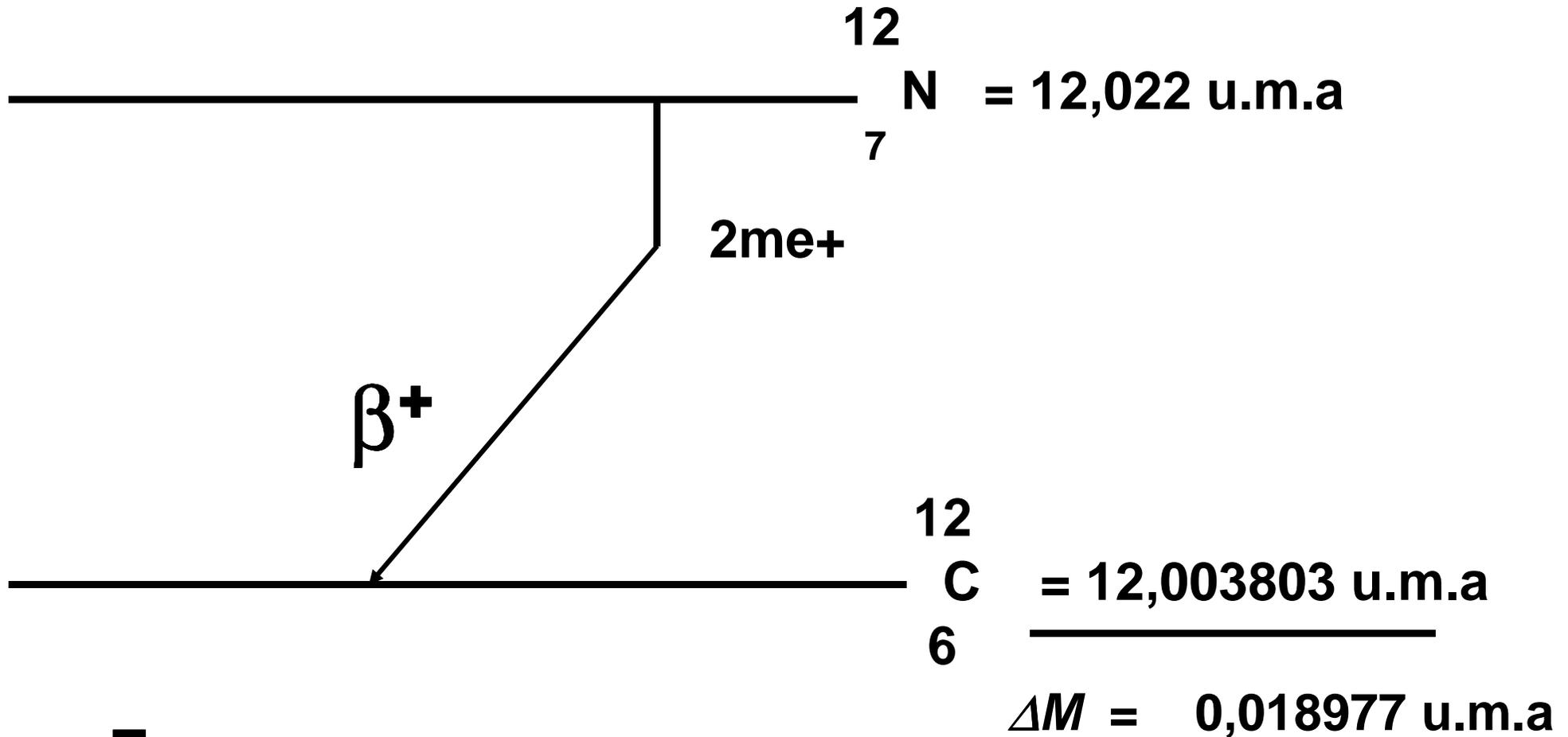
## Le bilan énergétique de $\beta^+$

- $Q_{\beta^+} = E_{\beta^+\max} = E_i - E_f$ , *Emission  $\beta^+$  possible si :*
- $M(A, Z) > M(A, Z-1) + m_{e^+} + m_\nu$ ; ( $m_\nu \approx 0$ ) or  $m_{e^-} = m_{e^+}$
- $E_{\beta^+\max} = [M(A, Z) - M(A, Z-1) + m_{e^+}] C^2$
- $M(A, Z) = M(A, Z) - Zm_e$  et  $M(A, Z-1) = M(A, Z-1) - (Z-1)m_e$
- $E_{\beta^+\max} = [M(A, Z) - M(A, Z-1) - 2m_e] C^2$
- $E_{\beta^+\max} = [M(A, Z) - M(A, Z-1)] C^2 - 2m_e \cdot C^2$

$$E_{1\beta^+} - 1,022$$

$E_{1\beta^+} > 1,022 \text{ Mev} : \text{Notion d'énergie seuil}$

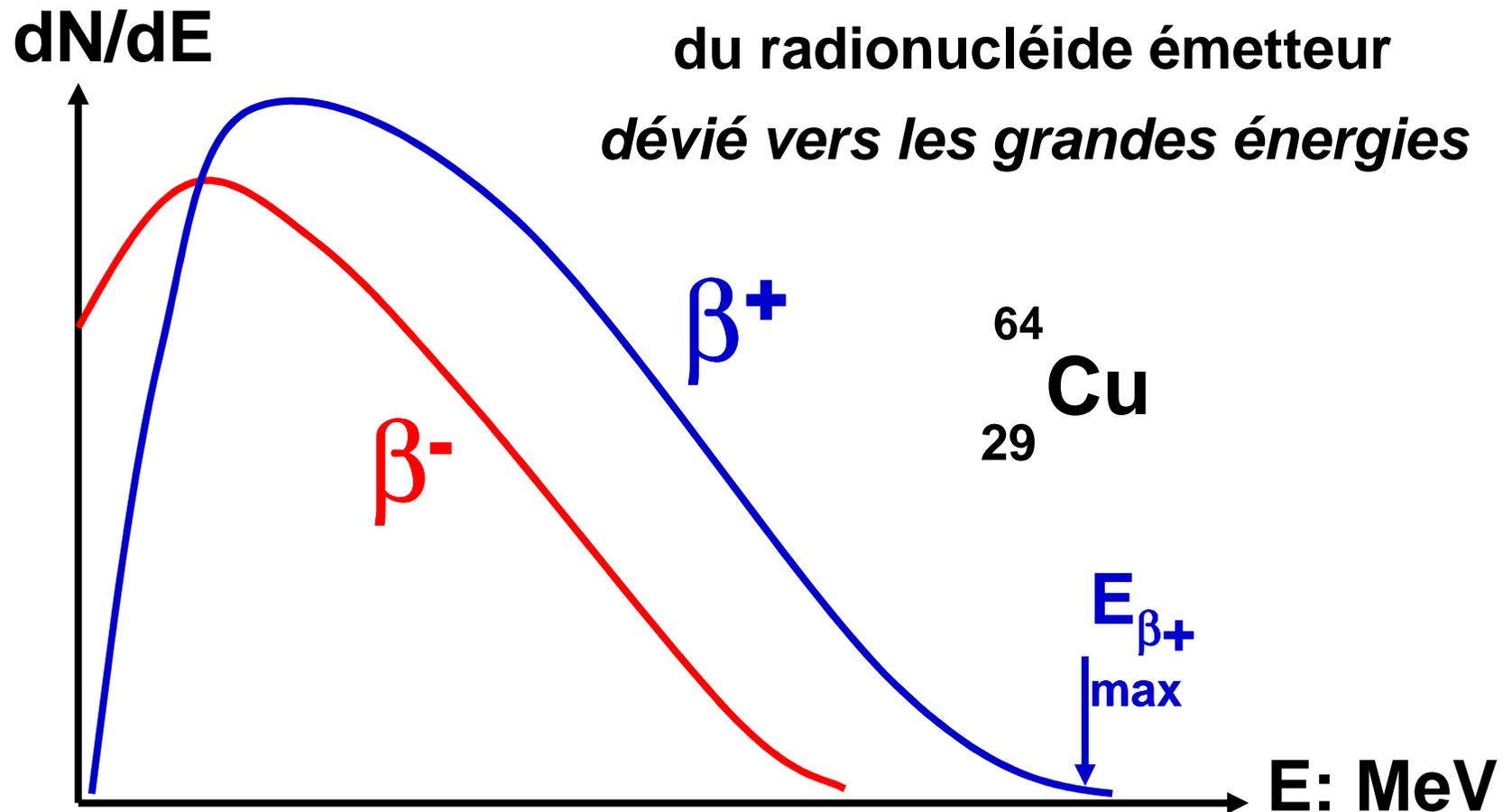
# Exemple $\beta^+$



$$\begin{aligned}
 E_{\beta^+ \text{ max}} &= (0,018977 \times 931) - 1,022 \\
 &= 16,65 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

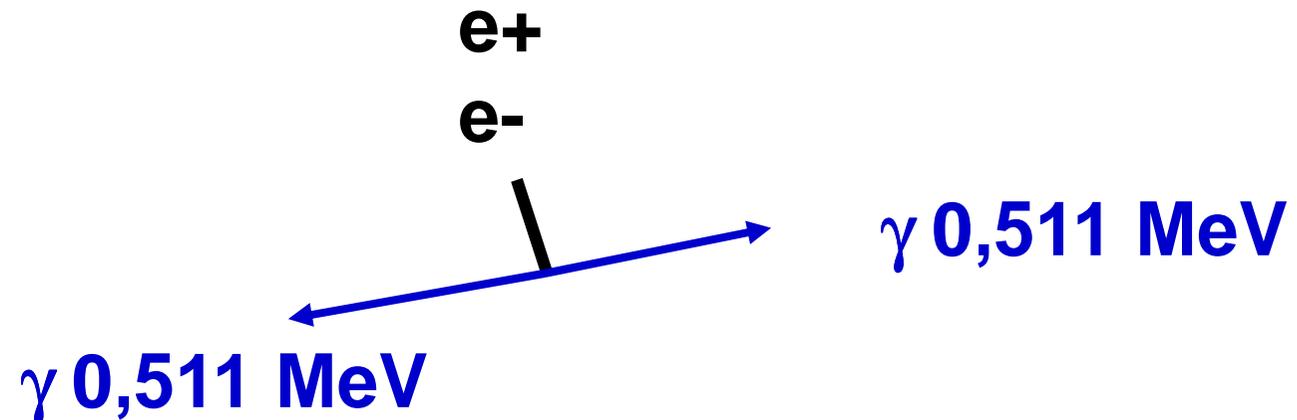
# Spectre $\beta^+$

Spectre continu caractéristique  
du radionucléide émetteur  
*dévié vers les grandes énergies*

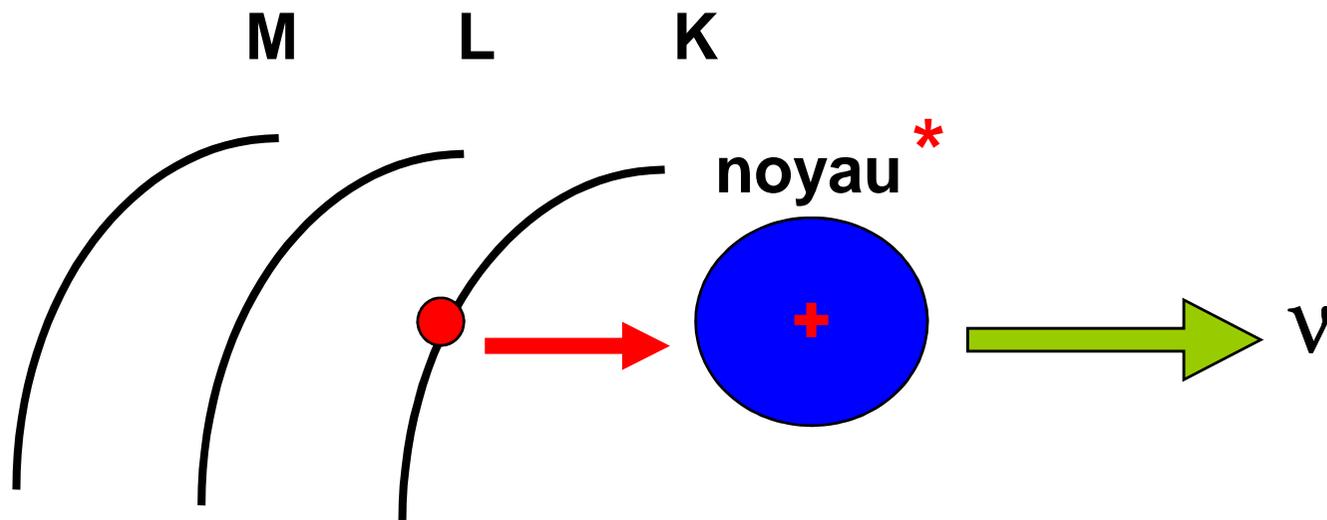


# Effets Secondaires

- Emission  $\beta^+$  ( $e^+$ ) se propage dans la matière en perdant son énergie. Au repos :  $e^+$  rencontre un  $e^-$  (matière) : d'où
- Annihilation avec émission de 2 photons  $\gamma$  **de même énergie** :  $h\nu = 0,511 \text{ MeV}$  émis dans 2 directions opposées

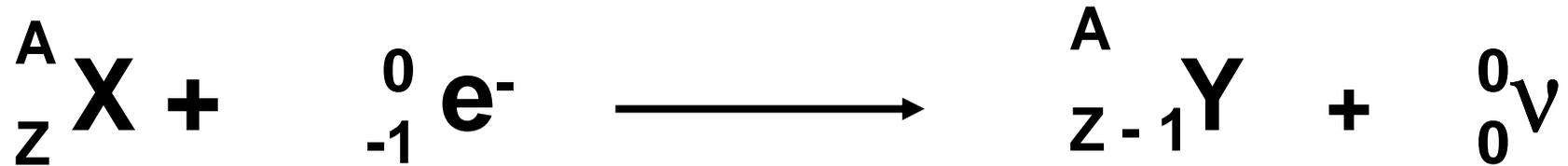


# Capture électronique : CE



# Capture électronique : CE

- cause : Excès de protons
- mécanisme :



## Bilan énergétique CE :

- $Q_{CE} = E_{CE} = E_i - E_f$  : Emission par C.E possible si :
- $M(A, Z) + m_e > M(A, Z-1) + m_\nu$  ; ( $m_\nu \approx 0$ )

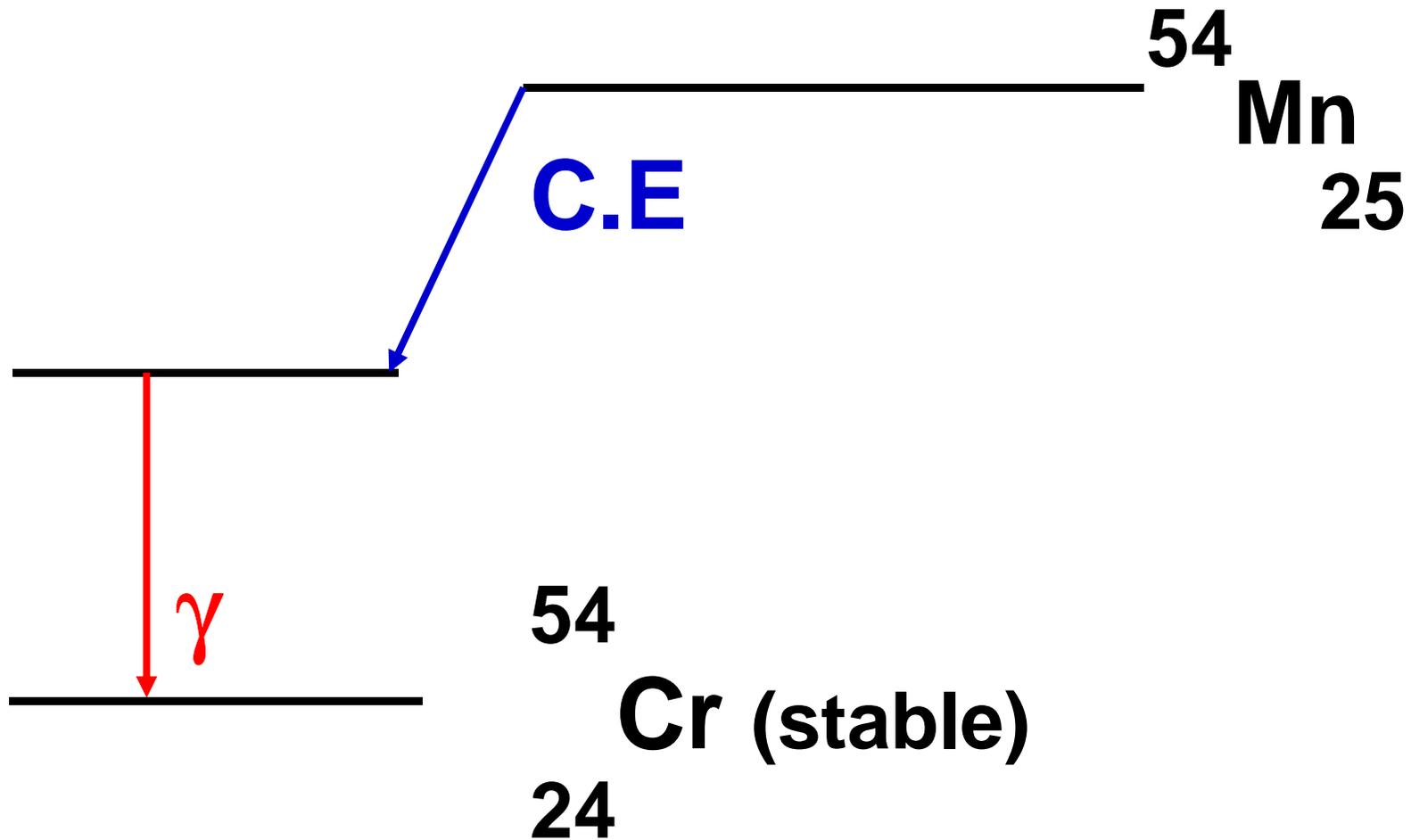
# Capture électronique

- $E_{CE} = [ M ( A , Z ) - M ( A , Z-1 ) ] C^2 - E_I$
- $E_{1CE} - E_I$
- CE possible si  $E_{1CE} > E_I$  : énergie de liaison
- $E_I = E_K^{+++} ; E_L^{++} ; E_M^+ \dots$

**Compétition entre  $\beta^+$  et la C.E : La C.E est favorisée si :**

- Energie seuil  $< 1,022\text{Mev}$
- Pour les noyaux lourds ( Z très élevé )

# Capture électronique



# Phénomènes secondaires à la CE

**1/ Emission d'un Rayonnement X: après une C.E:**

- «trou»: sur couche K+++ un vacance sur K atome\*: excité
- réarrangement électronique qui aboutit à:
- l'émission de RX caractéristique du noyau final.
- Ce RX émis est *un photon* qui a une énergie :

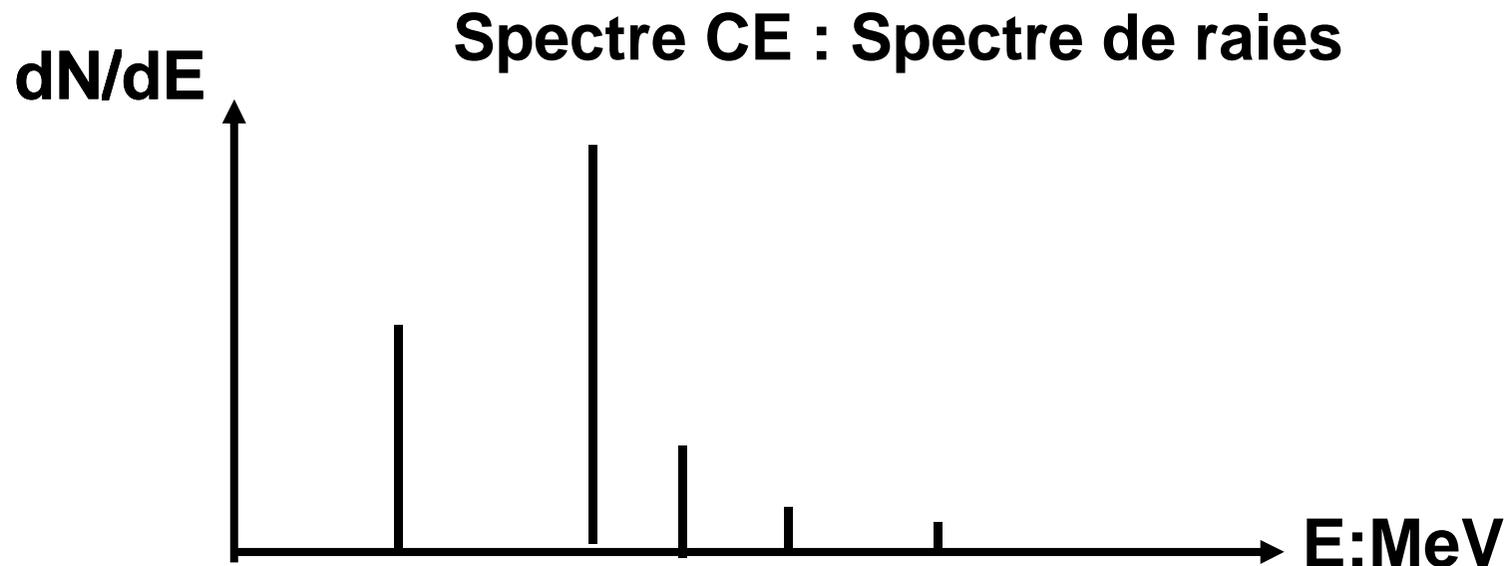
$$E_x = E_k - E_L$$

( l'électron transite de L  $\longrightarrow$  K )

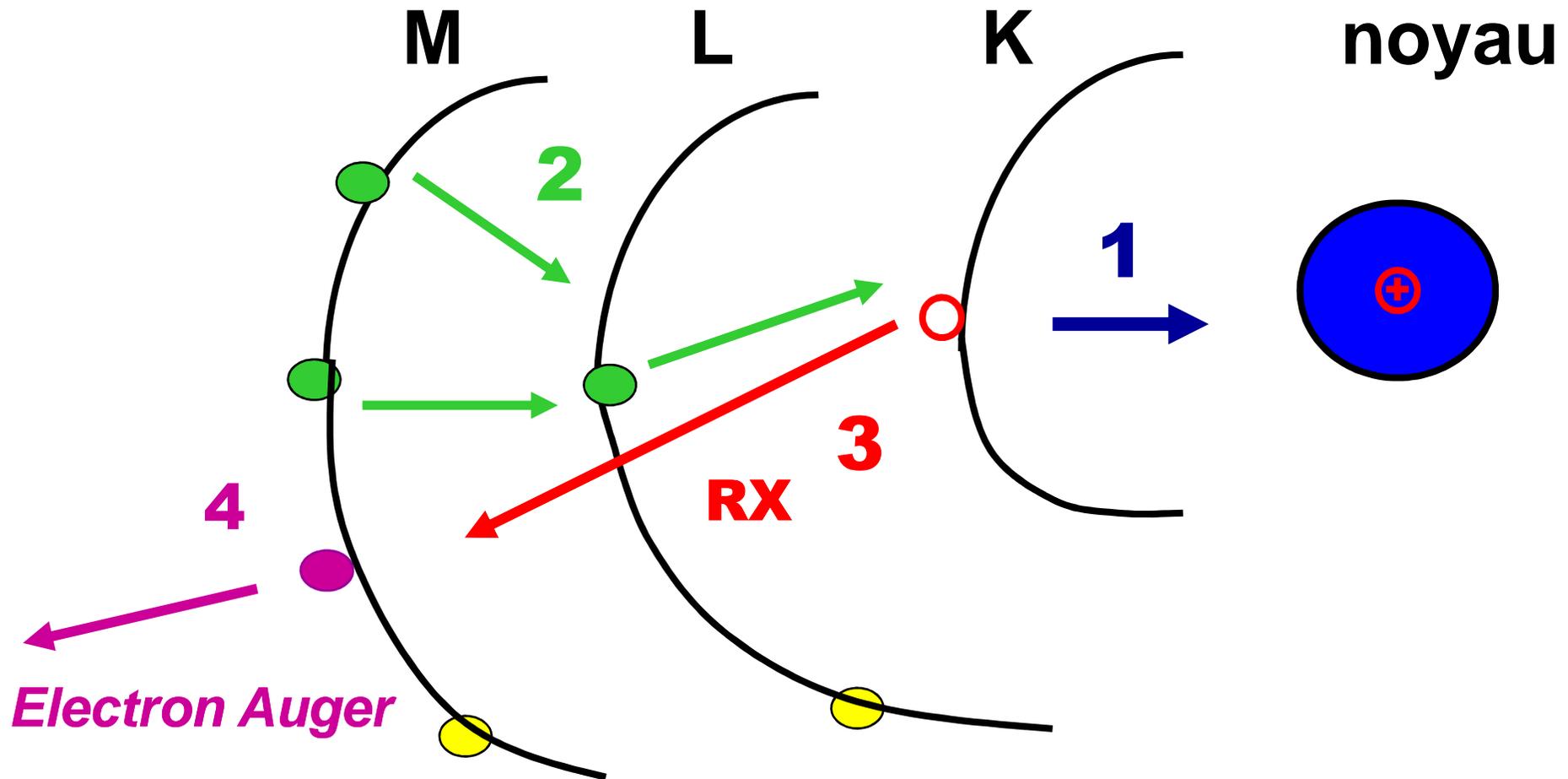
# Phénomènes secondaires à la CE

## 2/ *Electron Auger* :

- L'énergie de transition X interagit avec un électron périphérique qui sera ainsi libéré: **c'est l'électron Auger**



# Phénomènes secondaires à la CE: RX et électron Auger

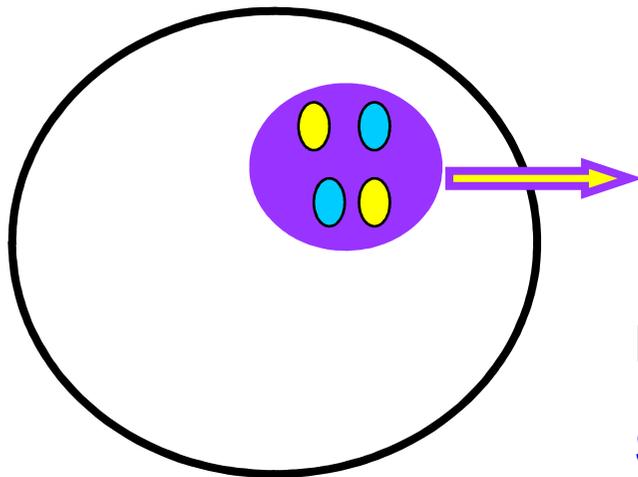


# Transformations par partition

- Zone 3 :**
- Noyau lourd instable Z très élevé
  - répulsions importantes
  - évolution vers la stabilité par :

## **Emission $\alpha$**

- Cause : Noyau lourd :  $N > 126$
- Mécanisme: - regroupement de 4 nucléons dans le noyau :



- 2 protons et 2 neutrons

- Emission d'une particule  $\alpha$  :  $E = 5 \text{ MeV}$

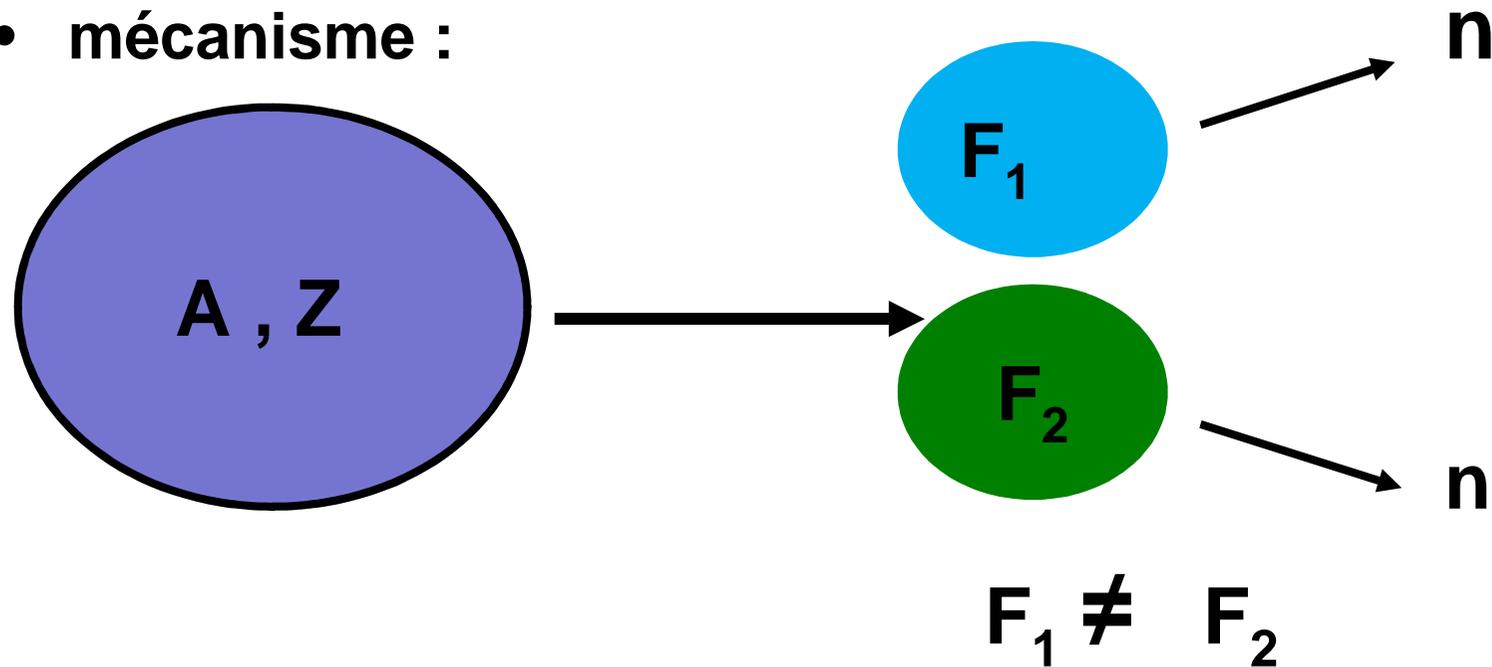
Noyau d'Hélium =  ${}^4_2\text{He}$

$$E_{\alpha} = [ M(A, Z) - (M(A-4, Z-2) + M_{\text{He}}) ] C2$$

**Spectre  $\alpha$  :** C'est un spectre de raies

# *Fission spontanée*

- Cause : noyaux lourds
- mécanisme :



**La probabilité de fission est faible.**

# Désexcitation électromagnétique des noyaux

Après émission:  $\alpha$  ;  $\beta^-$  ;  $\beta^+$  ; CE:

- Noyau\*: reste excité; d'où désexcitation par:
- $\gamma$  ; CI ; (  $e^+$ ,  $e^-$  )  $\longrightarrow$  Noyau stable

On distingue 2 types d'émission selon la durée de vie de l'état excité

**Émission spontanée:** durée de vie très brève :  $10^{-12}$  à  $10^{-11}$  s

**Emission métastable:** durée de vie longue :  $>$  à 0,1 s; :  $mA$



# Emission $\gamma$ (gamma)

Noyau\*

Désexcitation *sans changement de numéro atomique Z*

Instantanée

$10^{-6}$  sec  $\rightarrow$  1 sec

isomérique

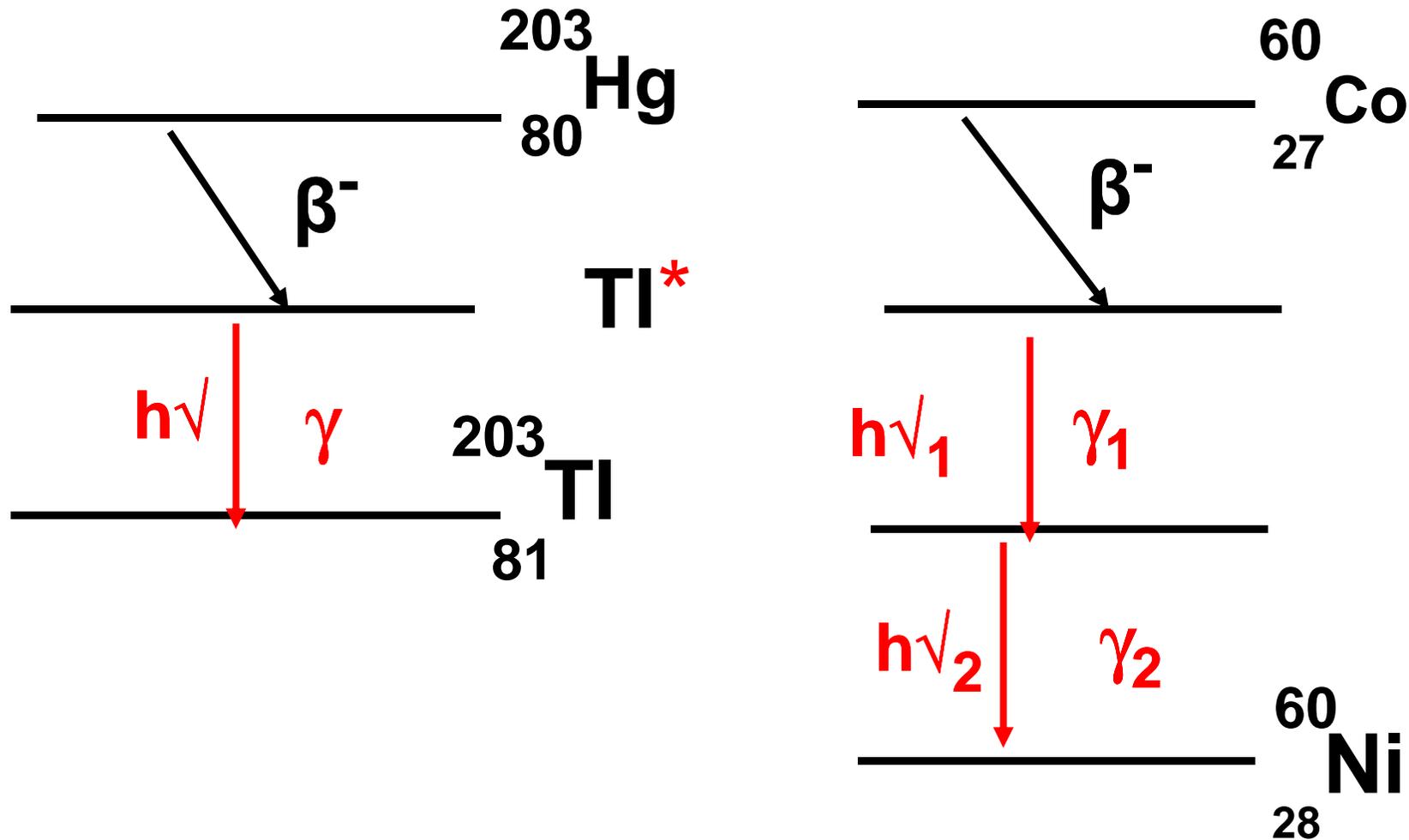
$> 1$  sec



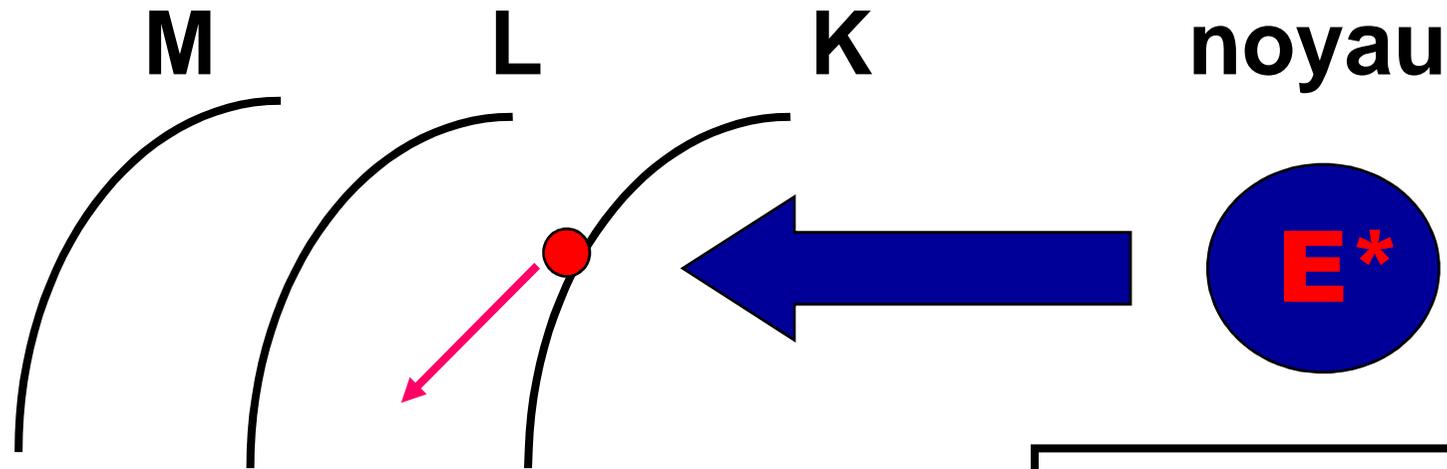
$$\nu = c / \lambda ;$$

$$E_\gamma = h \cdot \nu = E_i^* - E_f$$

# Emission $\gamma$ : exemple



# Conversion Interne : CI



**e- éjecté: émission d'un é:**

$$E_{e-CI} = E^* - E_k$$

**Phénomènes secondaires à la CI:**

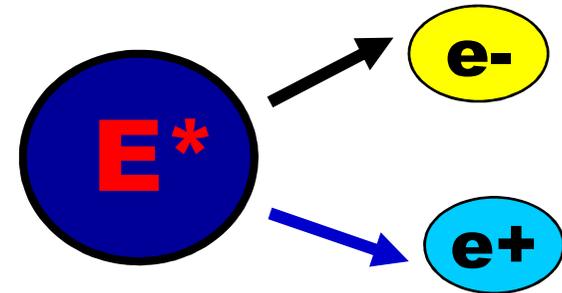
- émission de RX
- " é Auger

**$E^*$ :  $\gamma$  ou CI ? -  $\gamma$  si énergie grande**

**- CI si noyau lourd faiblement excité**

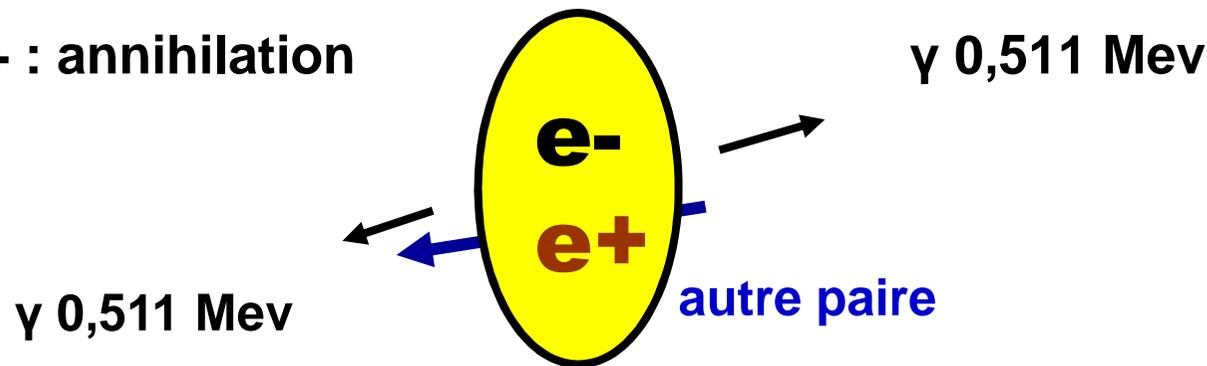
# Emission de Paire Interne

- Noyau\* :  $E^* \geq 1,022 \text{ MeV}$
- Désexcitation  $\longrightarrow (e^+, e^-)$
- $E_{e^-} + E_{e^+} = E^* - 1,022$



## Phénomènes Secondaires

- $e^+$  : annihilation



- $e^-$  : excitation ; ionisation des atomes de la matière



# Les lois de la radioactivité

## *Loi de décroissance radioactive: (1902)*

- Radioactivité : phénomène aléatoire, impossible de prévoir à quel moment un noyau radioactif va se transformer ;
- par contre, il est possible de déterminer la probabilité qu'a ce noyau, de se transformer par l'unité de temps:

$\lambda$  : **constante radioactive** ou probabilité de désintégration:

caractéristique du radionucléide , ne dépend :

- ni des conditions physiques ou chimiques,
- ni de l'âge de l'atome

# ***Expression du nombre d'atomes $N$ en fonction du temps***

$N(t)$  : présents à l'instant  $t$

$dN$  : se désintègrent entre  $t$  et  $t + dt$

$$\left. \begin{array}{l} N(t) : \text{présents à l'instant } t \\ dN : \text{se désintègrent entre } t \text{ et } t + dt \end{array} \right\} dN = - \lambda N(t) dt ; \text{ d'où}$$

$$\boxed{dN / dt + \lambda N = 0}$$

$$\int dN / N = - \int \lambda dt + \text{cte}$$

$$\ln N = - \lambda t + \text{cte} ; \text{ à } t = 0 : N = N(0) = \text{cte}$$

$$\ln N = - \lambda t + \ln N(0) \quad \text{et} \quad \ln N / N(0) = - \lambda t \quad \longrightarrow$$

$$N / N(0) = e^{-\lambda t} \quad \longrightarrow$$

$$\boxed{N(t) = N(0) e^{-\lambda t}}$$

**Le nombre d'atomes décroît exponentiellement avec le temps.**

# Période radioactive : T

- Temps T : le nombre d'atomes a diminué *de moitié*

$$N(T) = N(0) e^{-\lambda t} = N(0) / 2$$

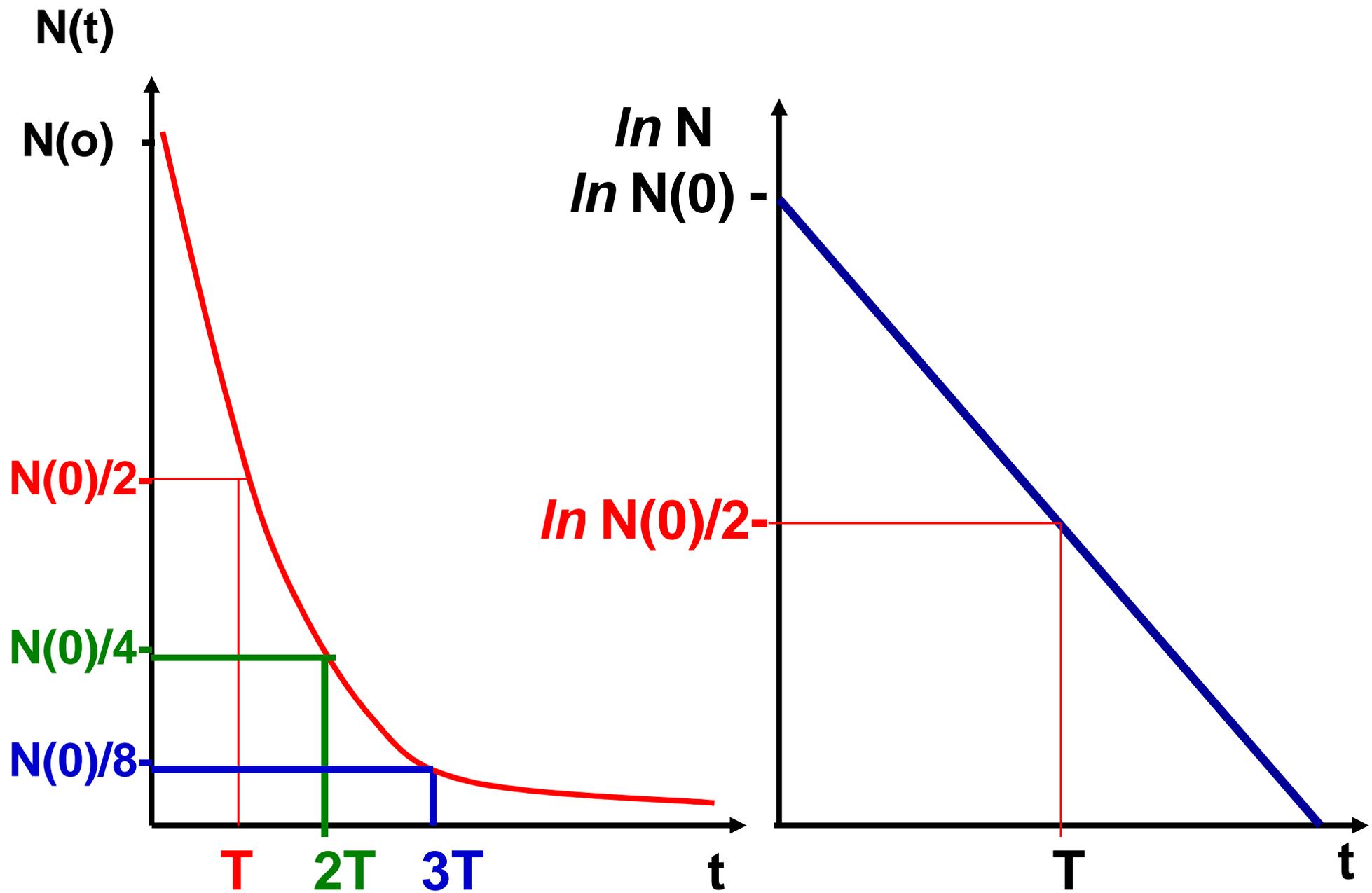
$$e^{-\lambda t} = 1/2 \longleftrightarrow e^{+\lambda t} = 2$$

$$\lambda T = \ln 2 = 0,693; \quad T = 0,693 / \lambda$$

- T: caractéristique d'un radio-isotope; non modifiée par des influences extérieures ( température  $\theta$ , pression...)

- T : Fraction de secondes  $\longrightarrow$  Milliards d'années

$${}^12_5\text{B} : T = 0,02 \text{ sec}; \quad {}^{238}_{92}\text{U} : T = 4,5 \text{ milliards années}$$



**Variation du nombre d'atomes\* en fonction du temps**

# L'activité A

- $N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$  : variation N en f (t);
- Or ce qu'on mesure c'est *l'activité: A* d'une source\*
- = nombre de désintégrations par unité de temps.
- $A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N(t)$ ;
- $A(t) = \lambda N(0) e^{-\lambda t}$  soit  $A(0) \rightarrow t = 0$

$$A(t) = A(0) e^{-\lambda t}$$

# Unités d'activité

- Unité d'activité *actuelle et légale* :  
**BECQUEREL : Bq**
- **1 Bq = 1 désintégration / seconde**
- *Unité ancienne et classique* : **CURIE : Ci**
- **1 Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq:**
- C'est l'activité de 1g de  $^{226}_{88}\text{Ra}$
- **1 m Ci =  $3,7 \cdot 10^7$  Bq = 37 MBq**

# Loi d'évolution de l'activité dans le temps

**Calcul de l'Activité Résiduelle (AR):** après 1 temps

→ nombre entier de périodes. Soit  $A_0$  : l'activité initiale

- Après 1 T A.R est :  $A_1 = A_0/2$
- Après 2T; A.R est :  $A_2 = A_1/2 = A_0/4 = A_0/2^2$
- Après 3T ; A.R est :  $A_3 = A_2/2 = A_0/8 = A_0/2^3$
- Après nT; A.R est :  $A_n = A_0/2^n$
- Après 10T, A.R est:  $A_{10} = A_0 / 2^{10} = A_0 / 1024 +++++$
- Après un temps de décroissance  $t \neq T$  :

$$A = A_0 e^{- (t / T) \cdot \ln 2}$$

# Les filiations radioactives

- $A^* \longrightarrow B^* \longrightarrow C^* \longrightarrow D$   
génétiqnement liés

- *Cas d'un élément en filiation*



- Cte\*

$$\lambda_1$$

$$\lambda_2 = 0$$

- $t = 0$

$$N_1(0)$$

$$N_2(0)$$

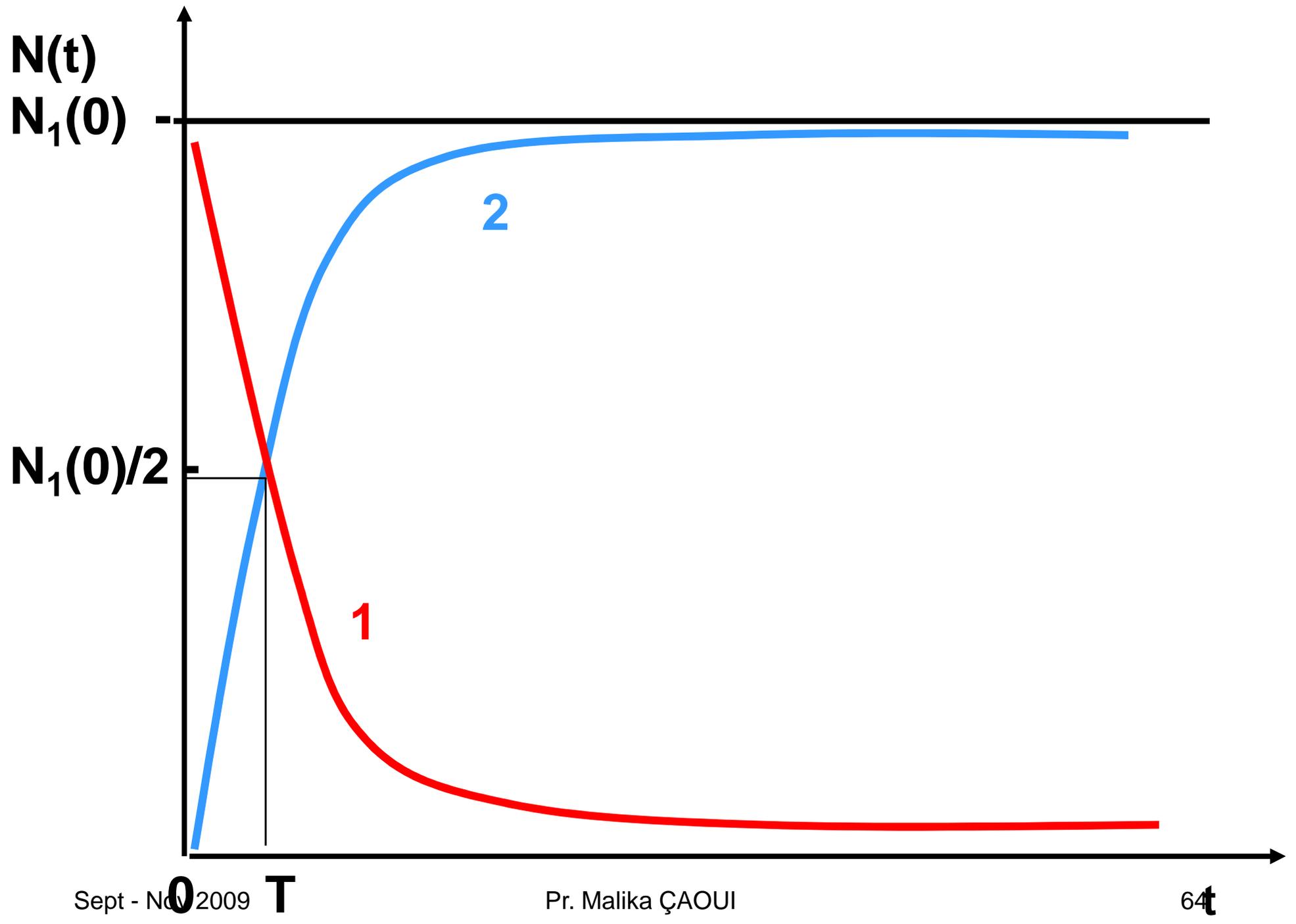
- 

$$N_1(t) ?$$

$$N_2(t) ?$$

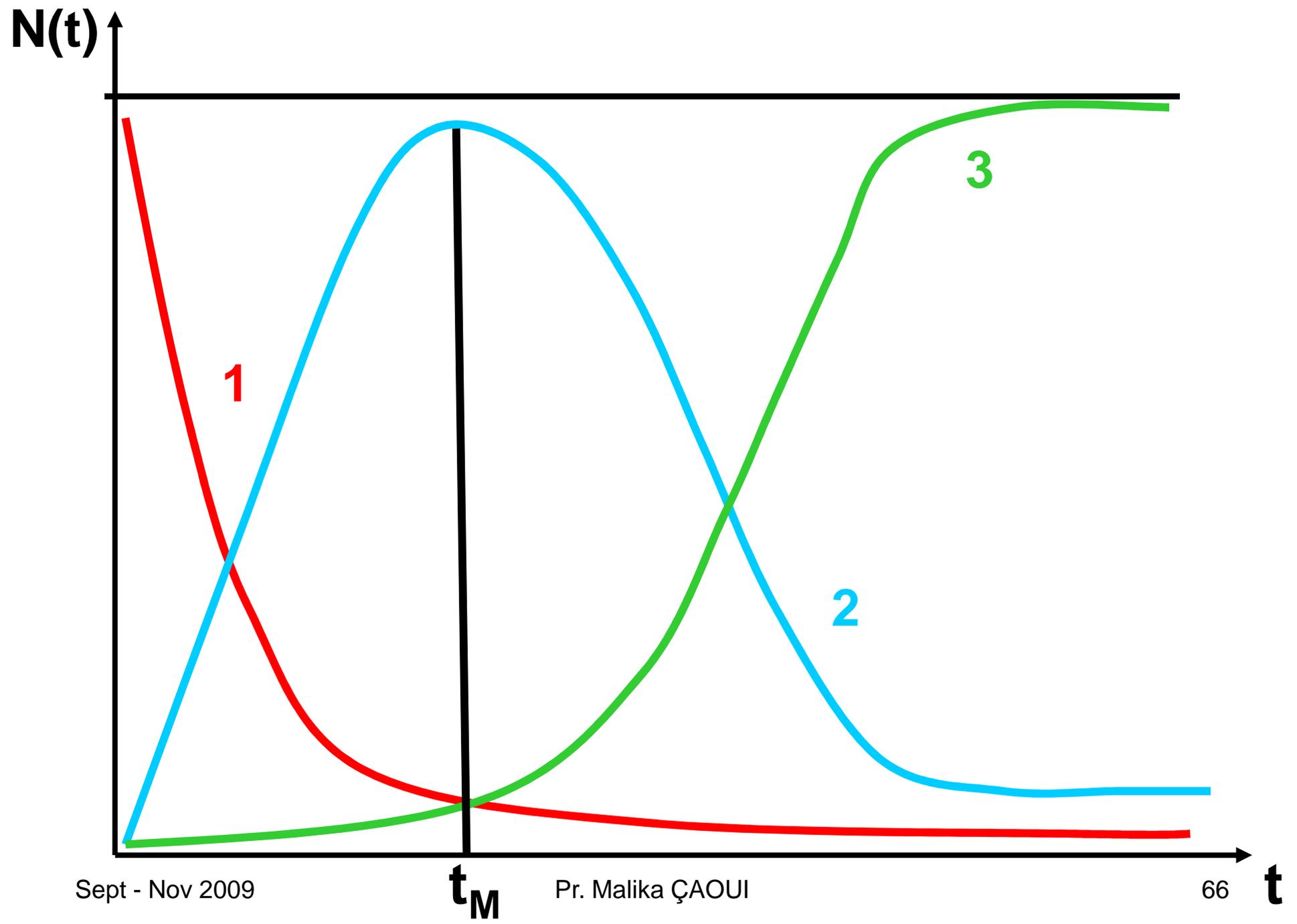
- $dN_1/dt = -\lambda_1 N_1$  : l'élément (1) 

- $dN_2/dt = +\lambda_1 N_1$  (2) : au même taux 



# Cas de 2 éléments en filiation

- Cte\*                    (1)                    (2)                    (3) Stable  
                           $\lambda_1 \longrightarrow \lambda_2 \longrightarrow \lambda_3 = 0$
- N (0)                 $N_1(0) \longrightarrow N_2(0) \longrightarrow N_3(0)$
- On cherche :  $N_1(t)$  ;  $N_2(t)$  ;  $N_3(t)$
- $dN_1/dt = -\lambda_1 N_1$
- $dN_2/dt = +\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$
- $dN_3/dt = +\lambda_2 N_2$



Sept - Nov 2009

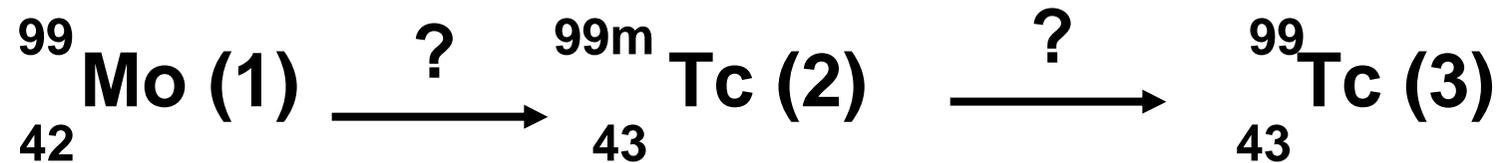
$t_M$

Pr. Malika ÇAOUI

66

$t$

## ***Exemple important***



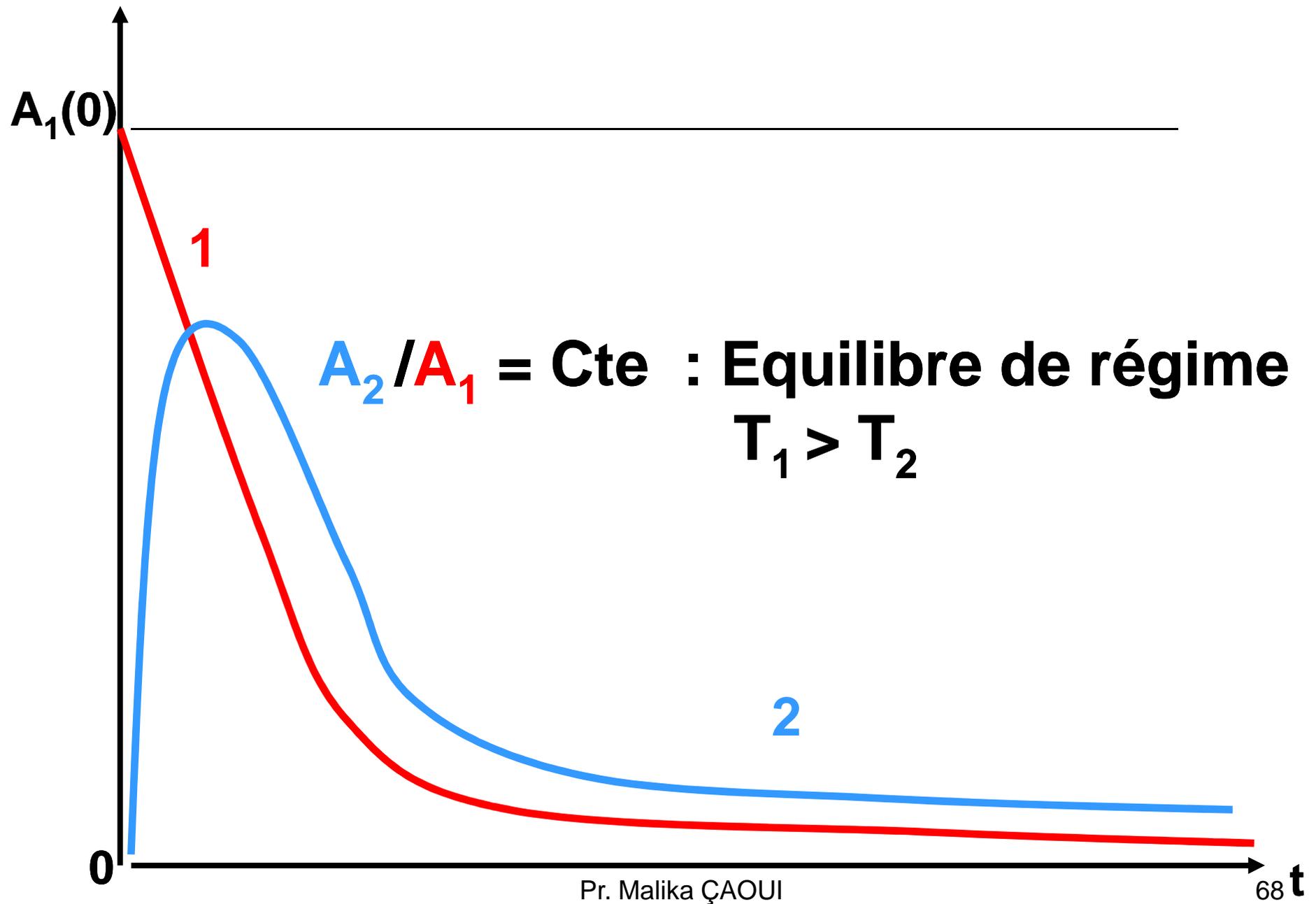
$$T_1 = 67\text{h}$$

$$T_2 = 6\text{h}$$

$$\lambda_1 = 10^{-2} / \text{h}$$

$$\lambda_2 = 12 \cdot 10^{-2} / \text{h}$$

- $T_1 > T_2 \longrightarrow$  (2) décroît avec  $T_1$
- $A_2 / A_1 = \text{Cte}$  Equilibre de régime



Pr. Malika ÇAOUI

# Références bibliographiques

- [www.cnebm.n.jussieu.fr](http://www.cnebm.n.jussieu.fr) : Collège National des Enseignants de Biophysique et de Médecine Nucléaire
- Université Médicale virtuelle Française: Accueil > Recherche thématique>biophysique
- Catalogue et index des sites médicaux francophones (CISMEF)
- Notions de radiobiologie et de radiopathologie : cours de l'INSTN 2007-08
- D.J. GAMBINI / R. GRANIER, décembre 2000. Manuel pratique de radioprotection. Editions Médicales Internationales.
- Rapport sur les travaux de la 54<sup>ème</sup> session de l'UNSCEAR, 2006, supplément N° 46.
- Quelques Sites universitaires francophones Ex :
  - [www.chu-rouen.fr/](http://www.chu-rouen.fr/)
  - [www.univ-angers.fr/](http://www.univ-angers.fr/)
  - [www.univ-nantes.fr/....](http://www.univ-nantes.fr/)