

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 nécessaires pour établir un diagnostic

1- imagerie Radiologie: *imagerie par atténuation*

- Standard: du squelette ou des tissus mou (avec produit de contraste)
- La Tomodensitométrie (TDM) ou Scanner :

2- Imagerie Médecine nucléaire: *imagerie par émission* : In vivo

On administre un produit radioactif (traceur couplé par marquage ou non à un vecteur) et on apprécie sa fixation au niveau d'un organe ou structure: scintigraphies osseuse, du myocarde, de la thyroïde; du rein; du poumon...

3. Radiopharmacie: In vitro RIA: Radio Immuno Analyse

Méthode d'analyse utilisant un radioisotope pour mesurer avec précision, dans le sang, urines... des concentrations d'hormones, d'antigènes, des marqueurs tumoraux,

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: Elément 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

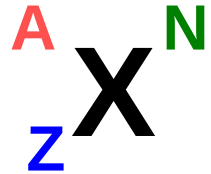
Nucléons:

- 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 Ze du noyau,
 - **caractéristique** d'un élément chimique de la table périodique de Mendeleïev

Le cortège électronique

- Masse é au repos: $0,9.10^{-27}\text{g}$: **1800 + faible / masse du nucléon**
- Électron: charge élémentaire négative: **$-1,6.10^{-19}\text{C}$ (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

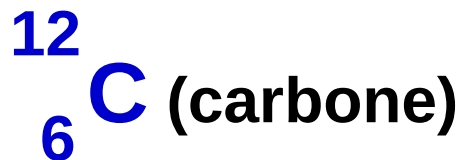


X: Symbole chimique de l'élément (Na; K; Cl; Fe, Zn..)

$$N = A - Z$$

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)



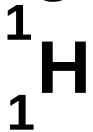
39é (89- 39)n; 39p

Isotopes

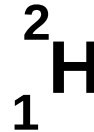
Éléments : *mêmes propriétés chimiques :*

Z constant mais ***A ≠*** donc ***N ≠***

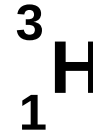
L'Hydrogène :



Hydrogène

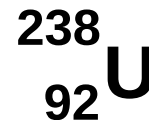
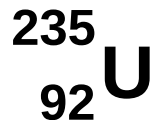
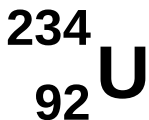


Deutérium



Tritium*

L'Uranium Naturel : trois Isotopes radio-actifs :

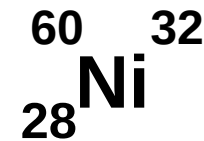
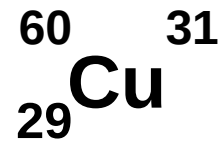
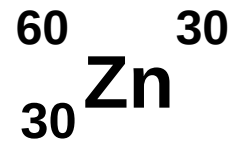


Le carbone 14: $\begin{matrix} 14 \\ 6 \end{matrix} \text{C}$

Le carbone 12: $\begin{matrix} 12 \\ 6 \end{matrix} \text{C}$

Isobares - Isotone - Isomères

Isobares : $A = \text{constant}$ et $Z \neq$



Les transformations spontanées conservant A : isobariques.

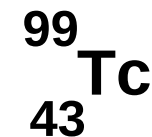
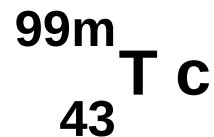
Isotones : $N = \text{constant}$ et $Z \neq$

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

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

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

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 $= 3.10^8$ 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_{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
- $\nu = c / \lambda$; ν : fréquence du rayonnement
- λ : 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 λ :

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

UNITES

Longueur

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

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'O₂ 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}C***

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

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

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

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

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

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

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

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: ΔM 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	μ
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 ≈ 325 :
 - 274 : stables
 - ≈ 51 instables : radio éléments naturels
- Les réactions nucléaires dans les centres atomiques produisent des de nombreux radio-éléments artificiels

Historique sur la radioactivité

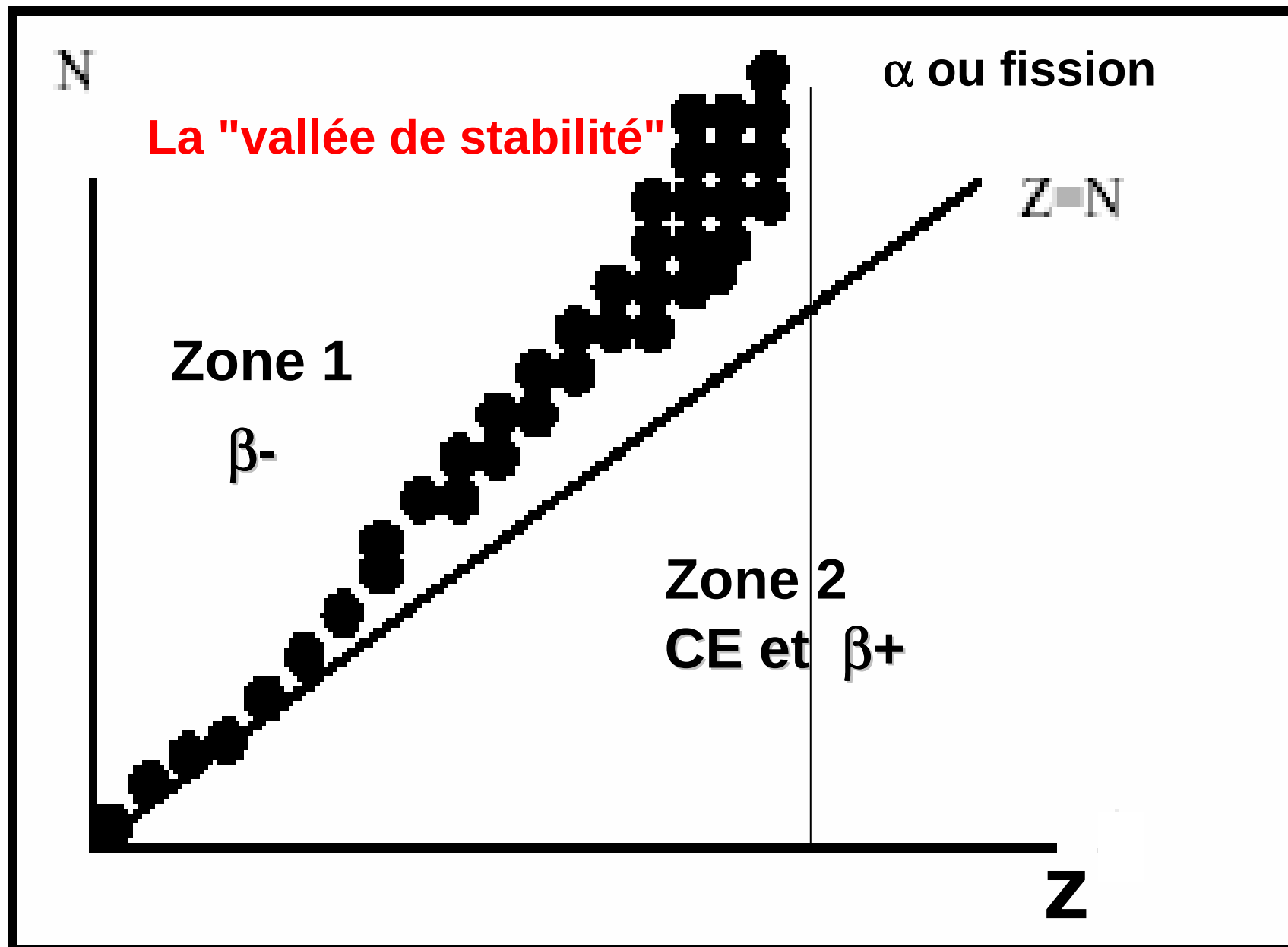
Röntgen: en 1895 découvre les Rayons X

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*****



Courbe de stabilité

On distingue 3 zones d'instabilité nucléaire

- **Zone 1** : Excès de N : désintégration β^-
- **Zone 2** : Excès de Z : désintégration β^+ et capture électronique (CE)
- **Zone 3** : Excès Z + N située au delà de La « vallée de stabilité » (VS)
où les noyaux sont volumineux : (désintégrations α 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 (β^-)
- **Proton :** deux possibilités de transformations :
 - $p \longrightarrow n + e^+$: émission (β^+)
 - $e^- + p \longrightarrow n$: 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 γ** : énergie émise sous forme d'un photon d'origine nucléaire
 - *Production de paire interne* (e^+ , e^-)

Emission β^-

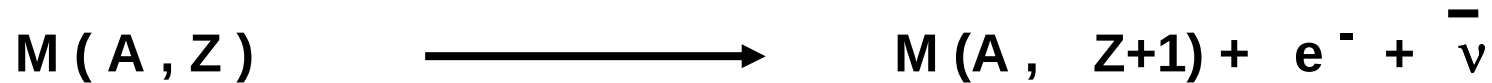
- ❑ Cause : excès de neutrons
- ❑ mécanisme : n excédentaire



- ❑ Emission : - d'un Rayonnement β^- (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 = β^-

Emission β^-

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_{β^-} : bilan énergétique de β^-

Conditions : Emission β^- possible si :

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

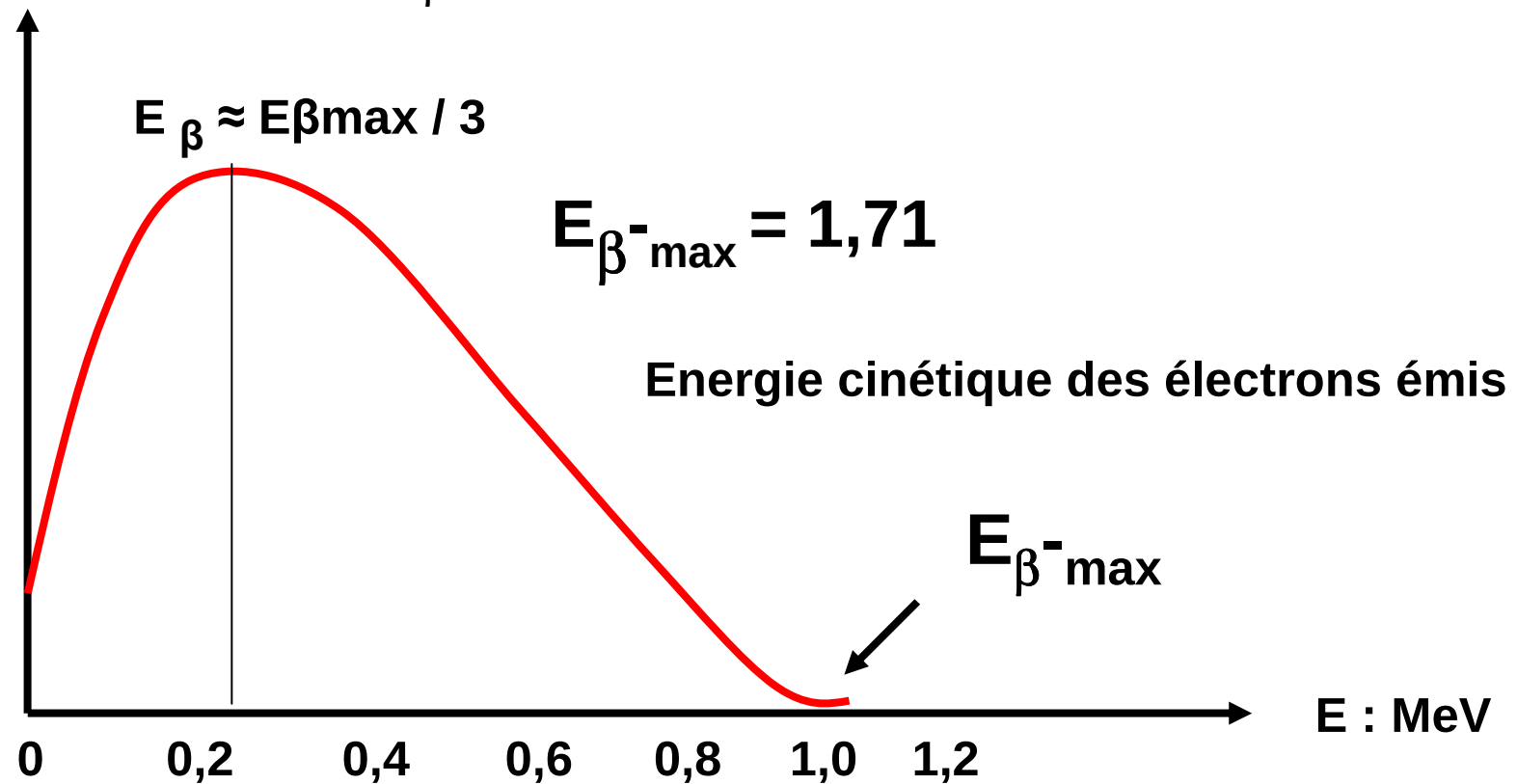
Emission β^-

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

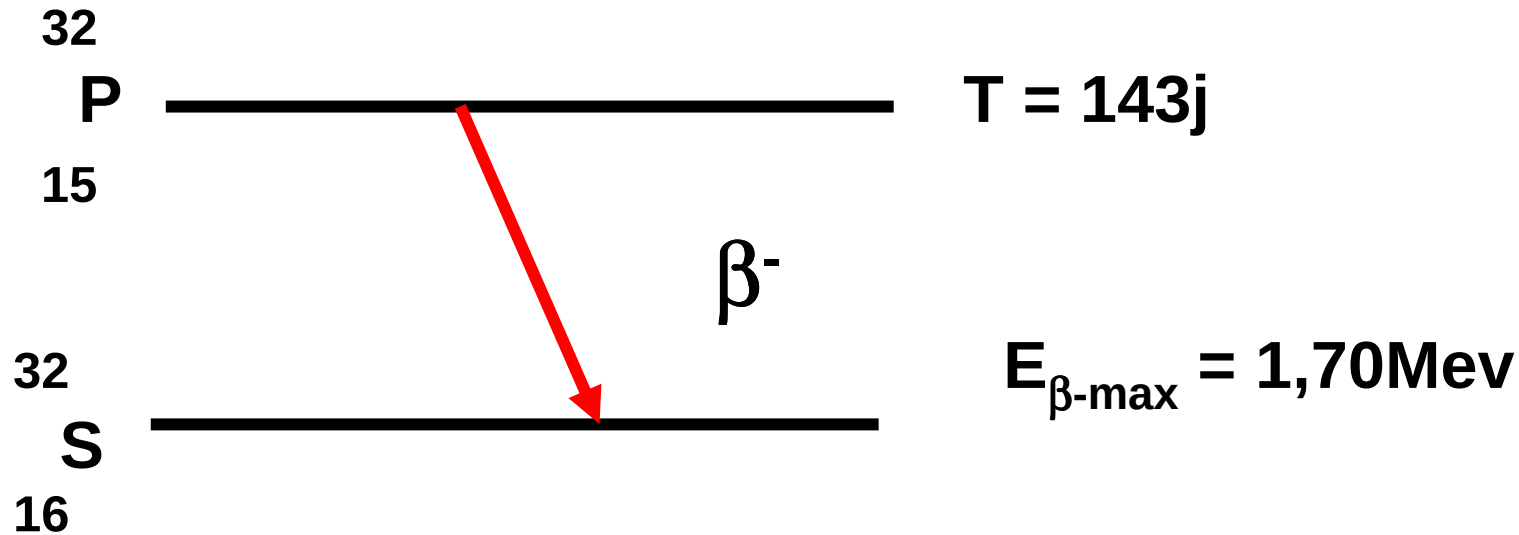
Spectre β^-

- *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 β^-

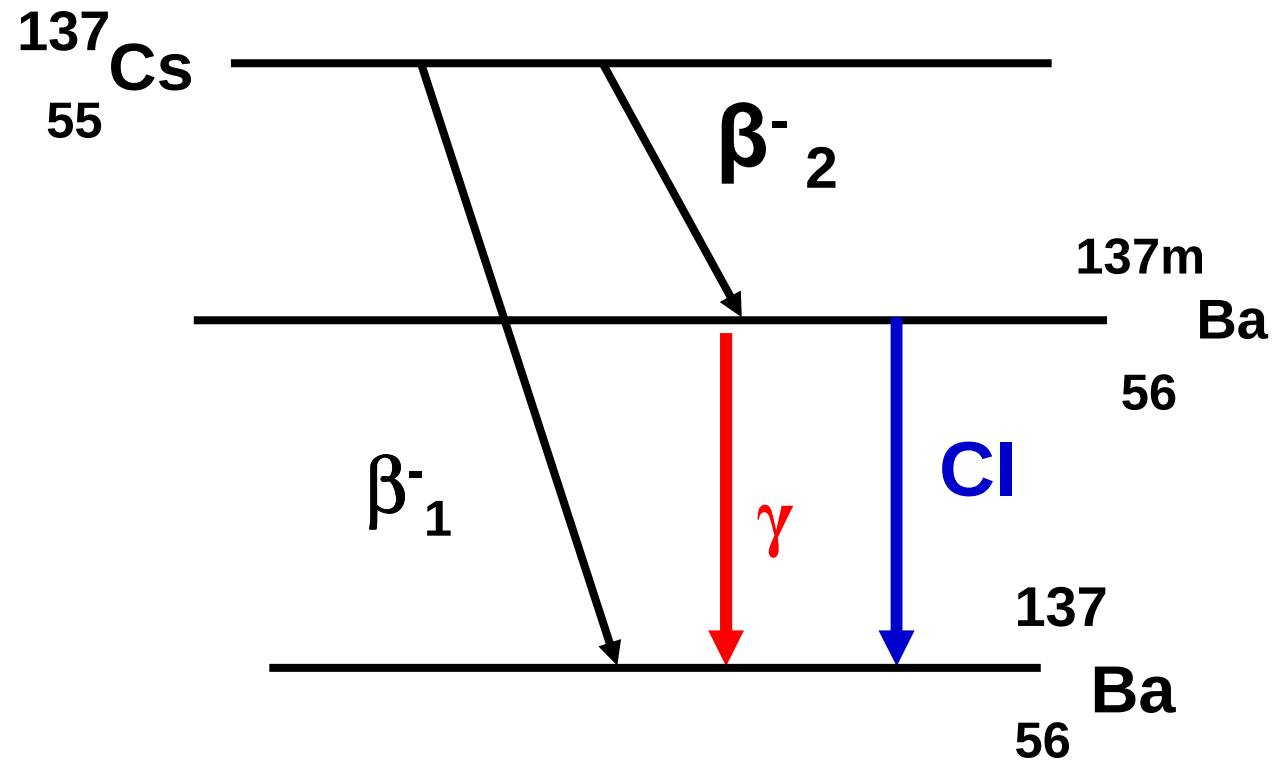


$$^{32}_{15}\text{M}_\text{P} = 31,98403 \text{ u.m.a}$$

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

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

- $Q_{\beta^-} = E_{\beta^- \text{max}} = 931 \times 0,00183 = 1,70 \text{ MeV}$
- $I_{\beta^-} = 100\%$ 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 β^+

- cause : excès de protons
- Mécanisme :



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

Emission β^+

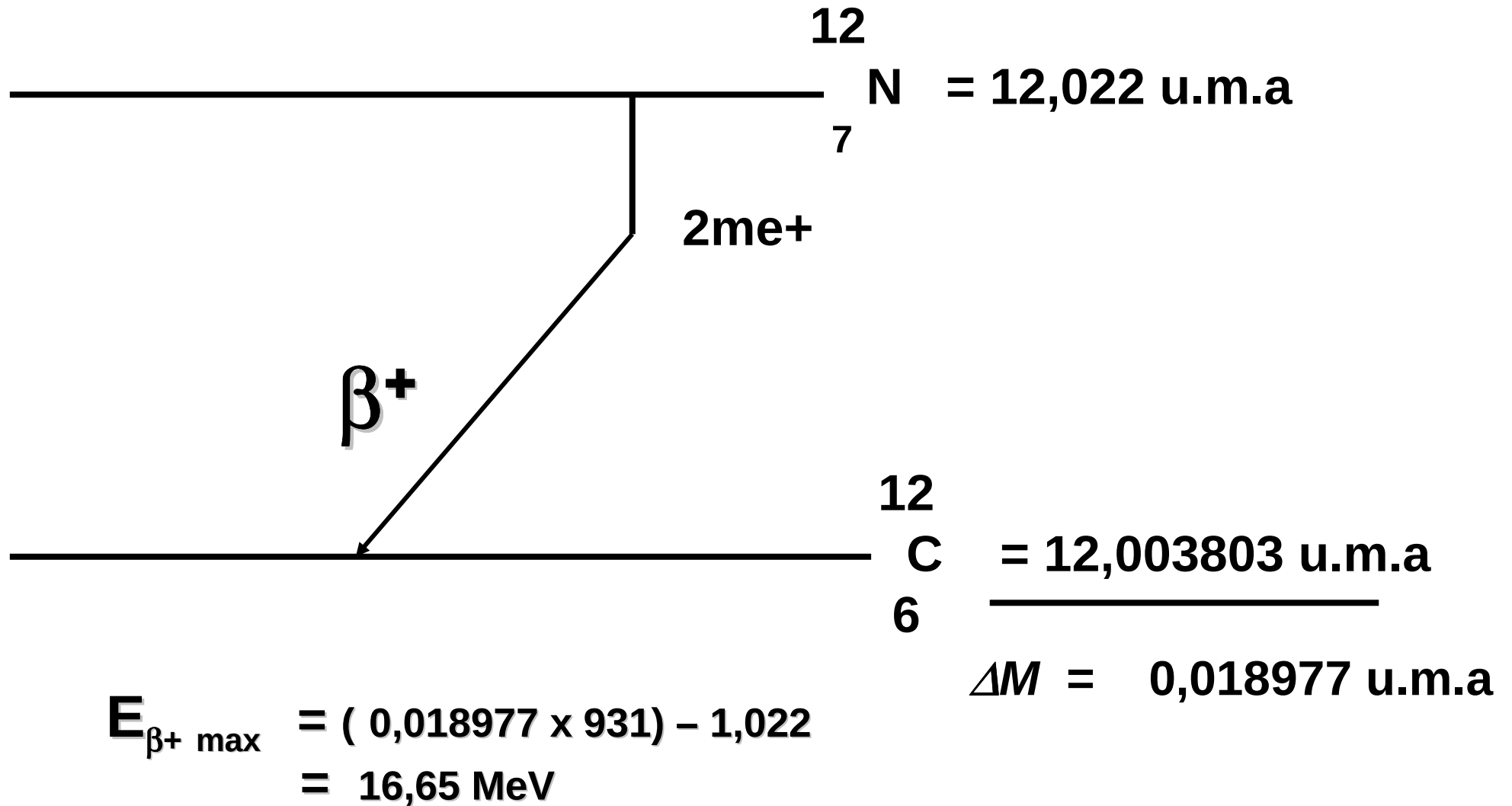
Le bilan énergétique de β^+

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

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

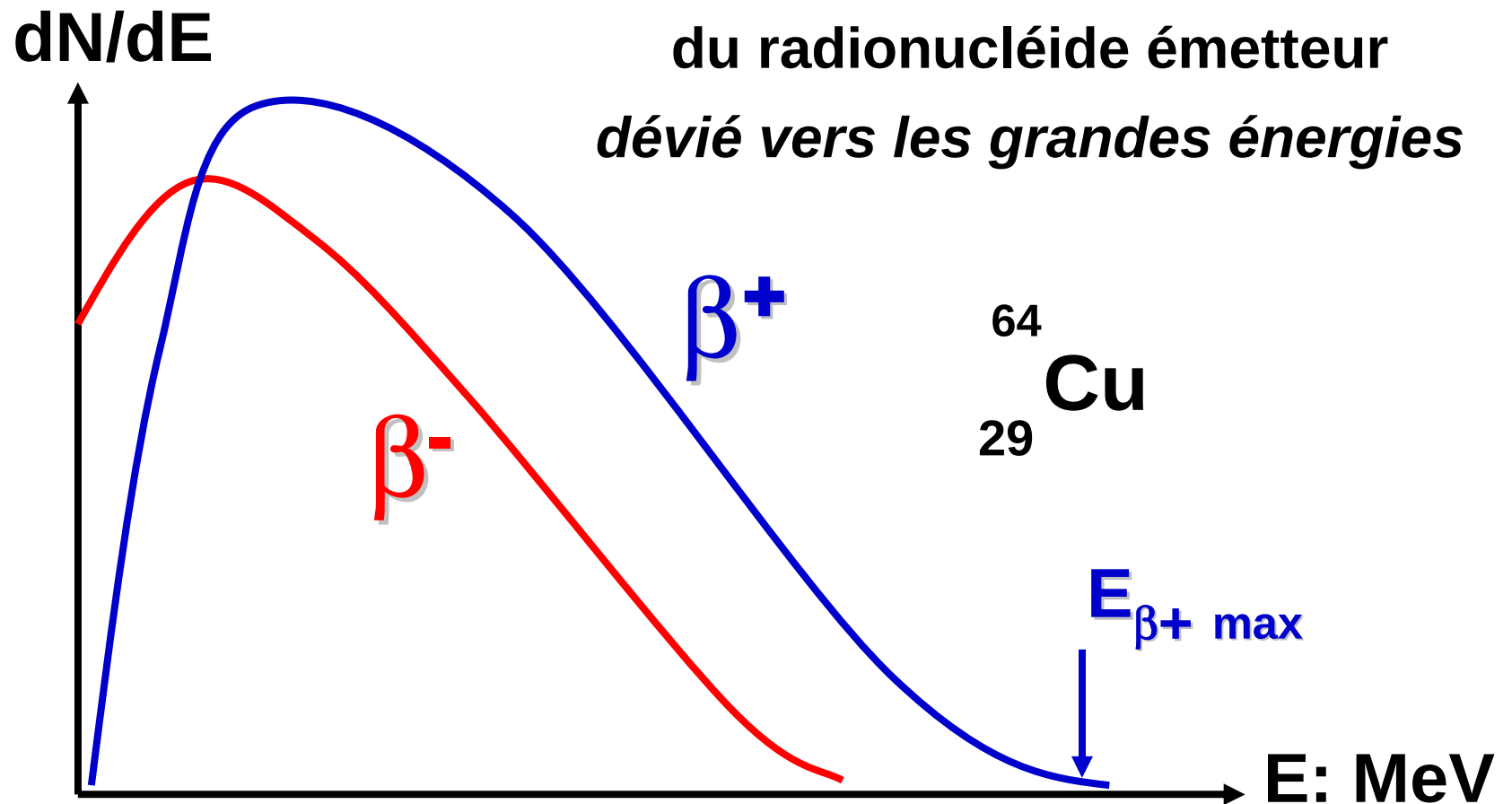
$E_{1\beta^+} > 1,022 \text{ Mev} : \text{Notion d'énergie seuil}$

Exemple β^+



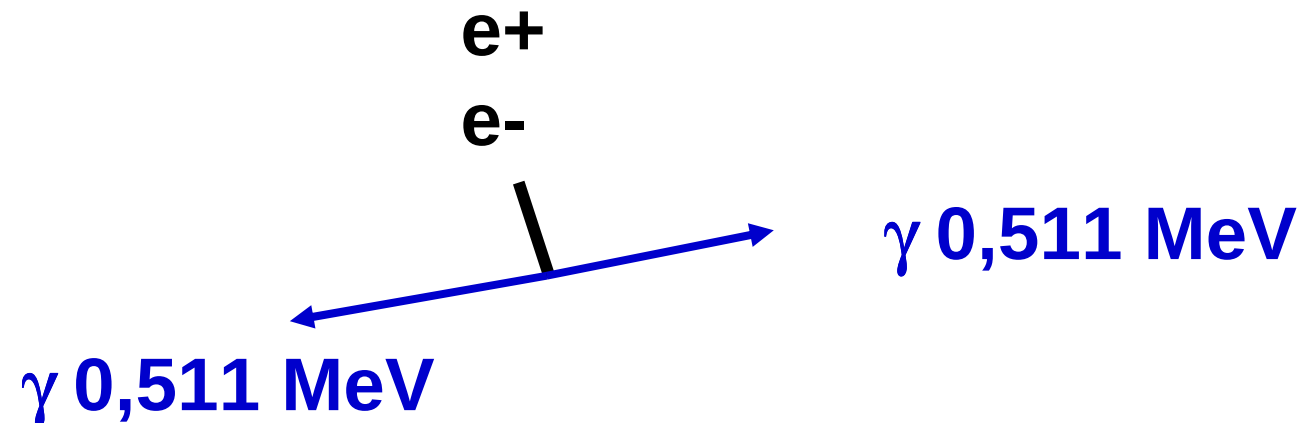
Spectre β^+

Spectre continu caractéristique
du radionucléide émetteur
dévié vers les grandes énergies

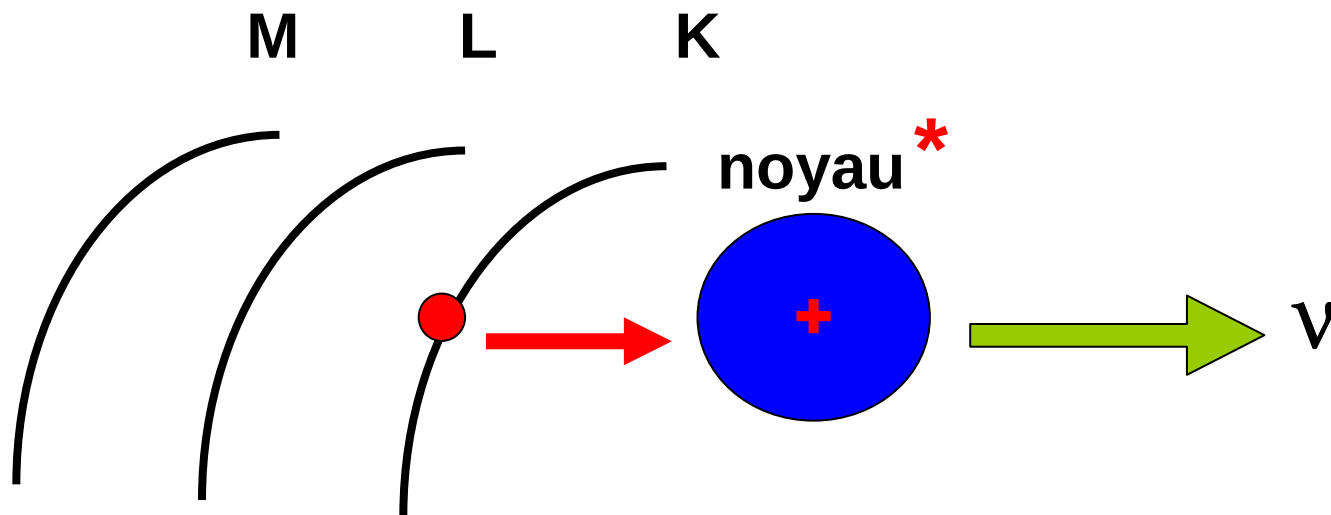


Effets Secondaires

- Emission β^+ (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 γ **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 :

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

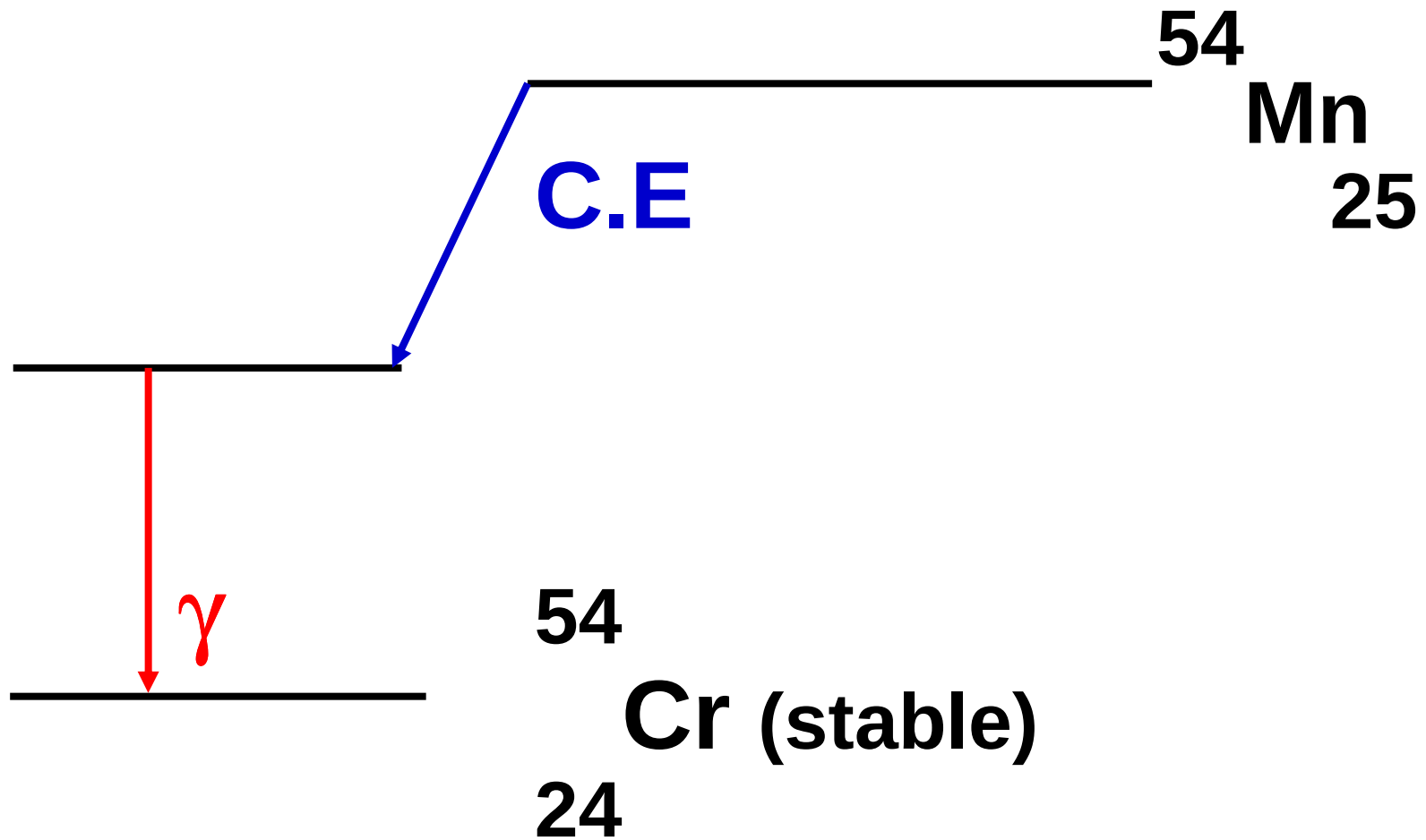
Capture électronique

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

Compétition entre β^+ 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 :

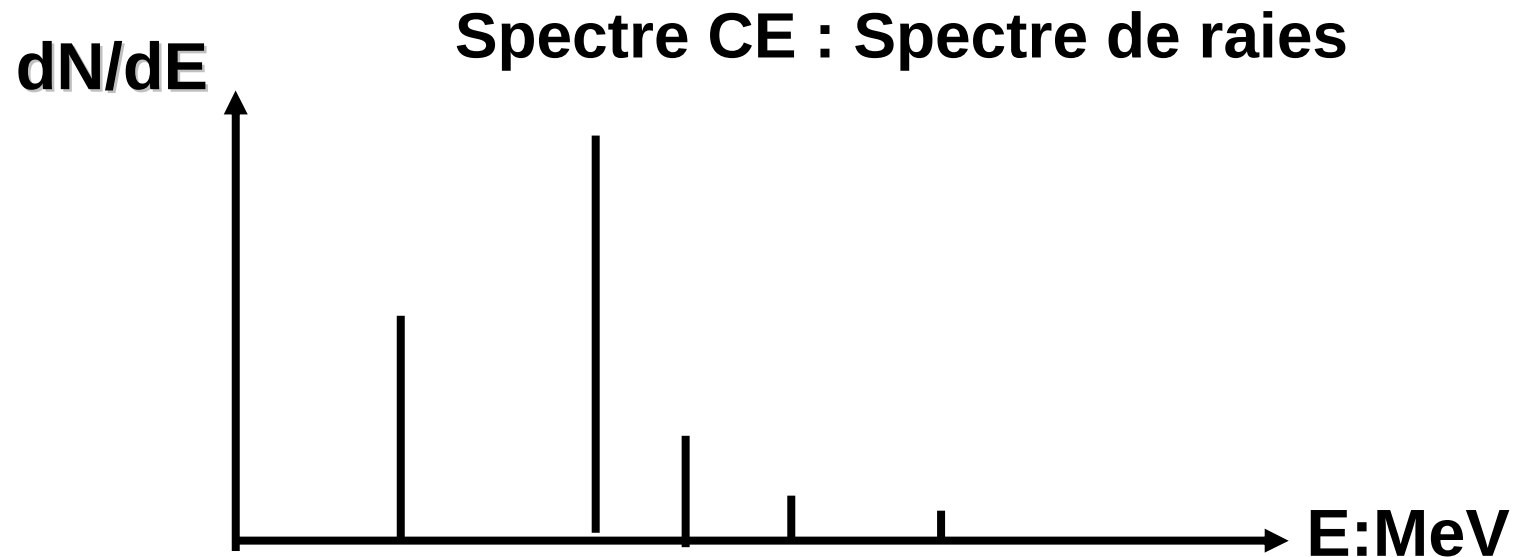
$$E_x = E_k - E_L$$

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

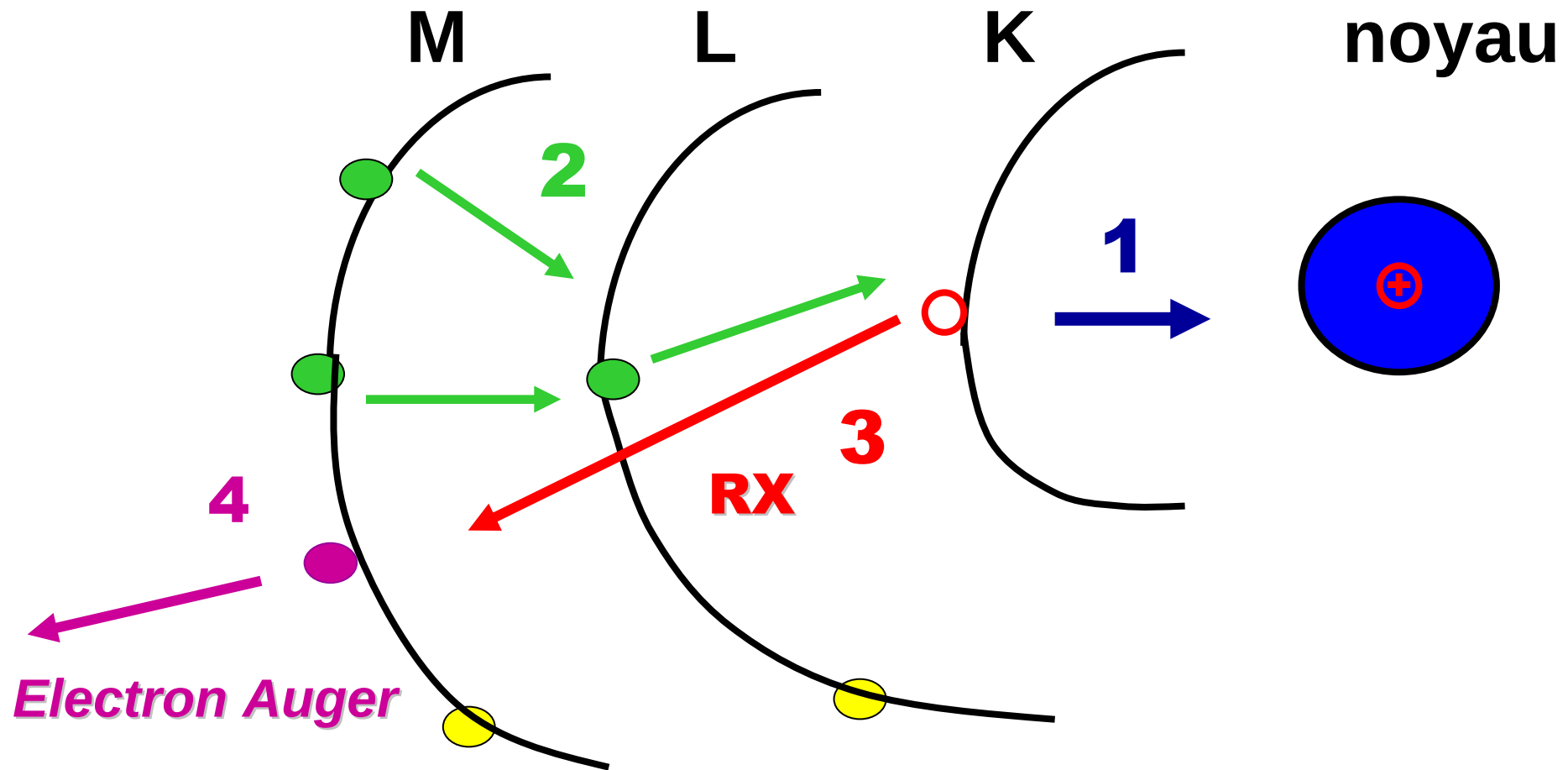
Phénomènes secondaires à la CE

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

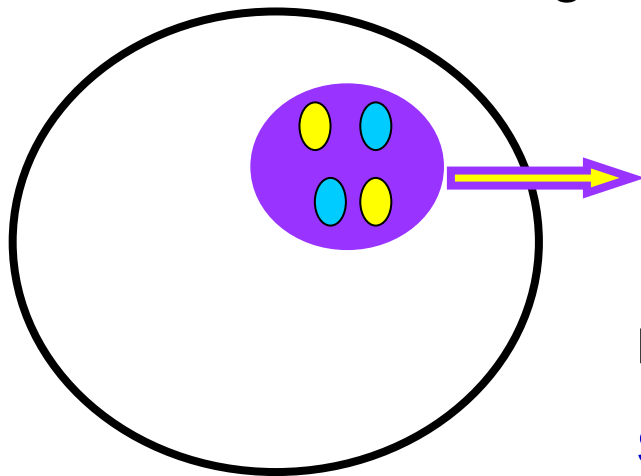


Transformations par partition

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

Emission α

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



- 2 protons et 2 neutrons

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

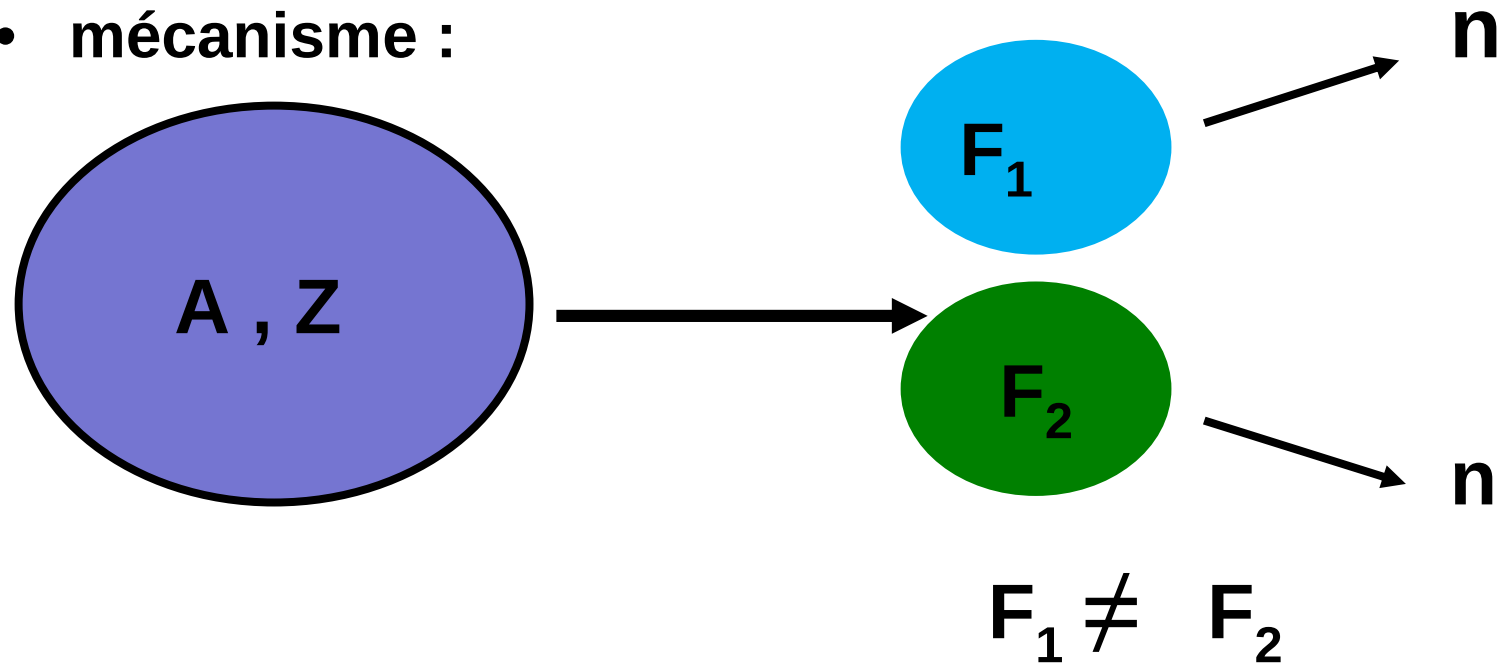
Noyau d'Hélium = ${}^4_2\text{He}$

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

Spectre α : C'est un spectre de raies

Fission spontanée

- Cause : noyaux lourds
- mécanisme :



La probabilité de fission est faible.

Désexcitation électromagnétique des noyaux

Après émission: α ; β^- ; β^+ ; CE:

- Noyau*: reste excité; d'où désexcitation par:
- γ ; 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 : $> 0,1$ s; : mA

Ex: ^{99m}₄₃Tc

Emission γ (gamma)

Noyau*

Désexcitation *sans changement de numéro atomique Z*

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

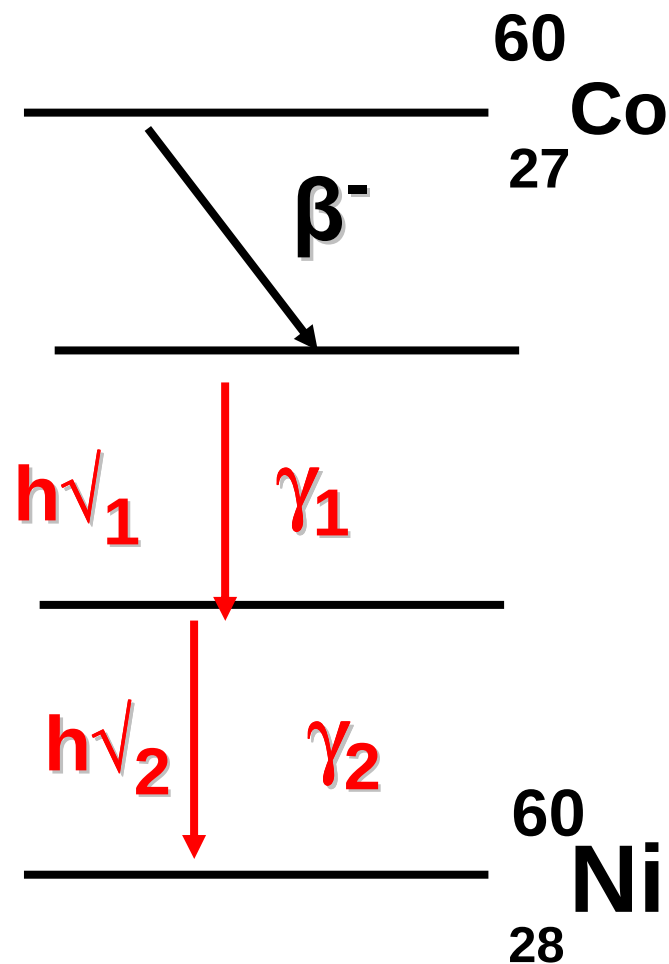
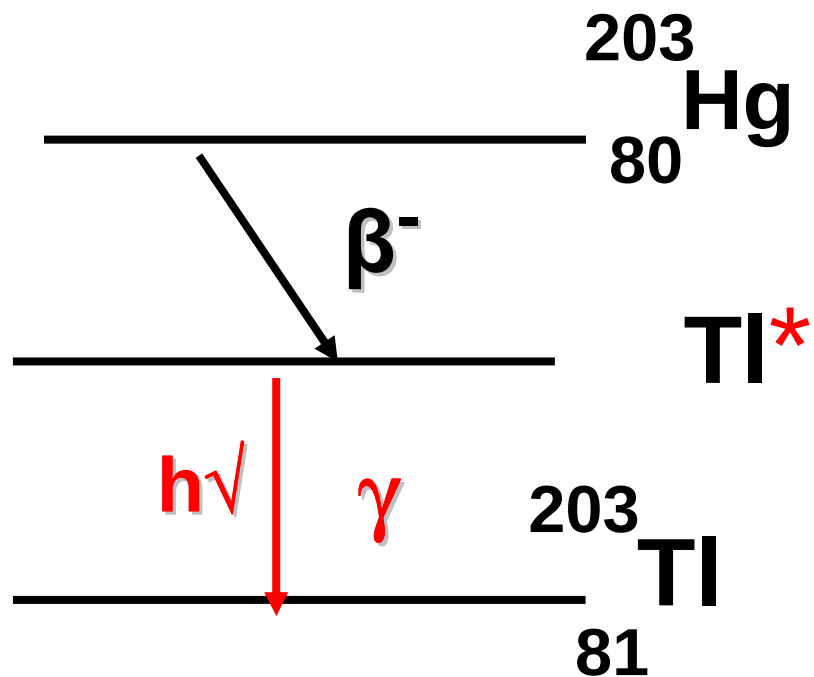
isomérique
 $> 1 \text{ sec}$



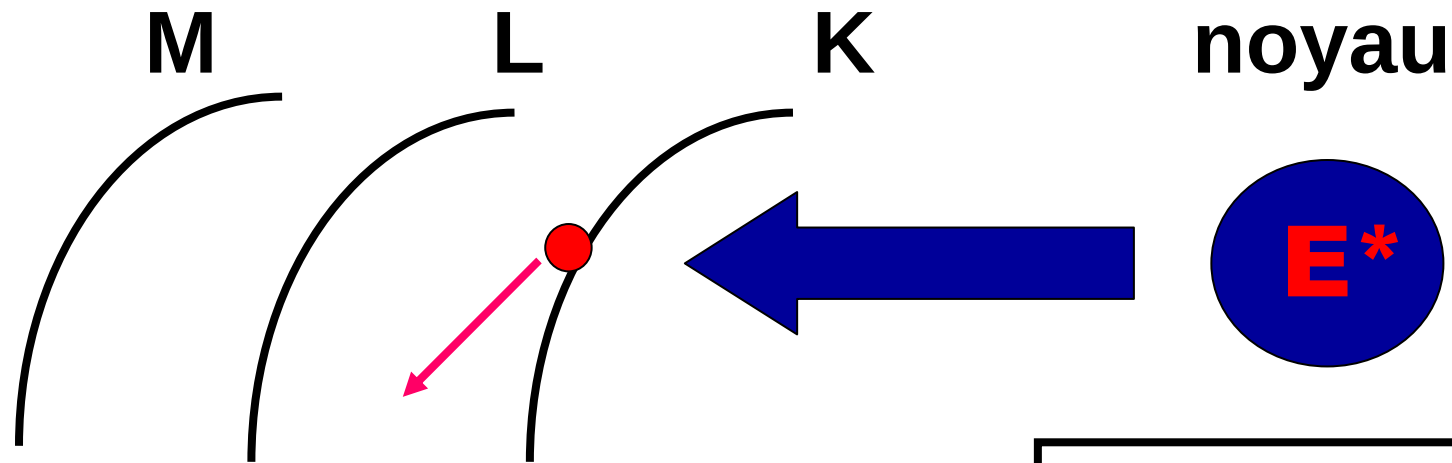
$$\nu = c / \lambda ;$$

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

Emission γ : 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*: γ ou CI ? - γ si énergie grande

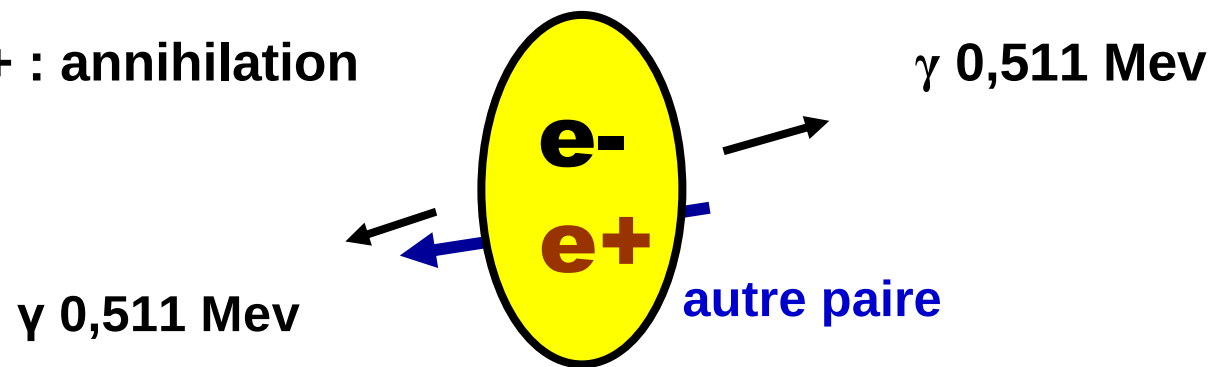
- CI si noyau lourd faiblement excité

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:

λ : **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 $t + dt$ } $dN = - \lambda N(t) dt$; d'où

$$dN / dt + \lambda N = 0$$

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

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

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

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

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

Le nombre d'atomes décroît exponentiellement avec le temps.

Période radioactive : T

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

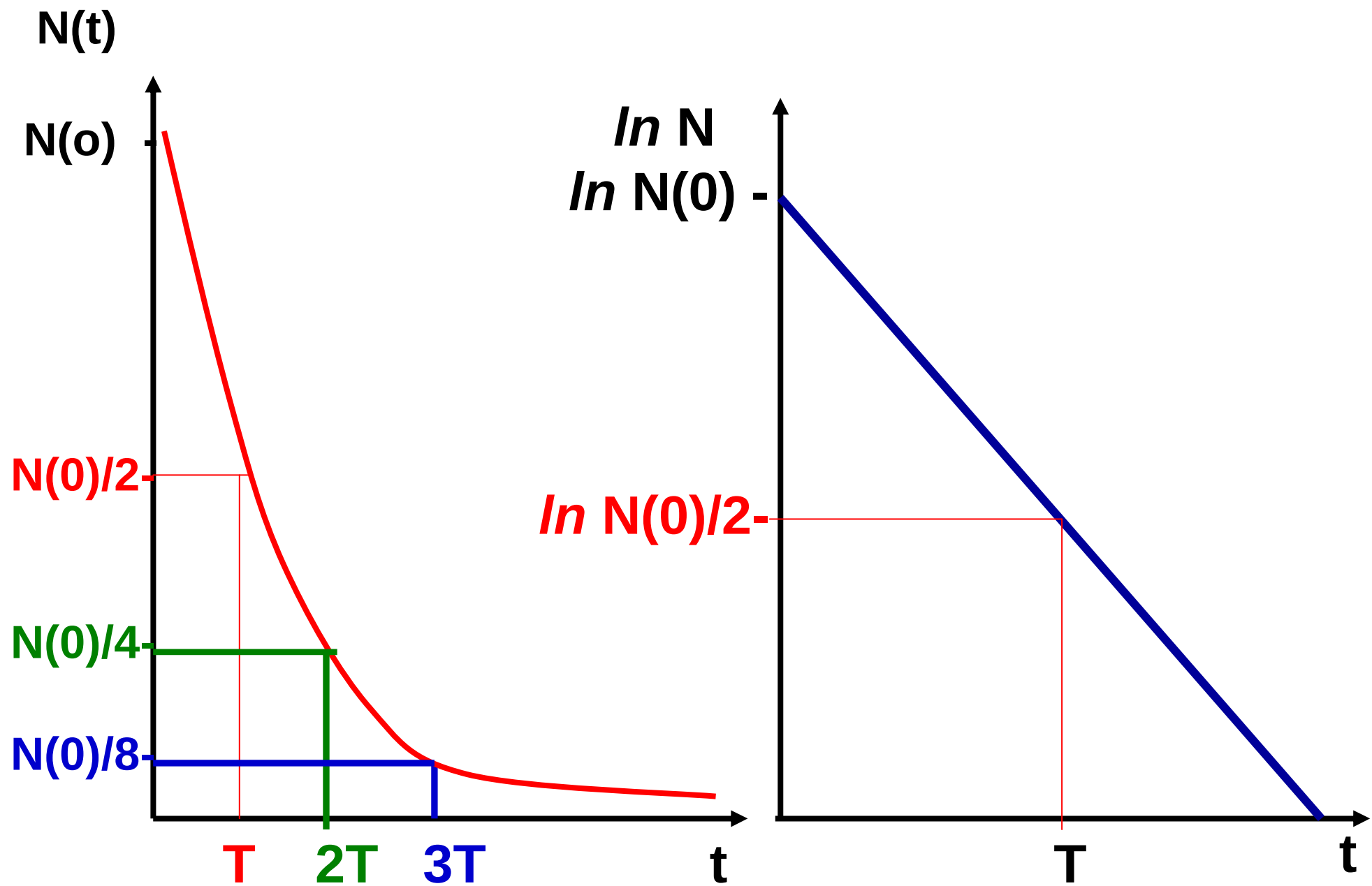
$$N(T) = N(0) e^{-\lambda t} = N(0) / 2$$

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

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

- T: caractéristique d'un radio-isotope; non modifiée par des influences extérieures (température θ , pression...)
- T : Fraction de secondes $\longrightarrow$ Milliards d'années

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



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.
- $A(t) = \left| dN/dt \right| = \lambda N(t)$;
- $A(t) = \lambda N(0) e^{-\lambda t}$ soit $A(0) \rightarrow t = 0$

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

Unités d'activité

- Unité d'activité *actuelle et légale* :
BECQUEREL : Bq
- **1Bq = 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

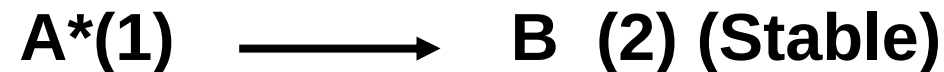
- Après 1 T A.R est : $A_1 = A_0/2$
- Après 2T; A.R est : $A_2 = A_1/2 = A_0/4 = A_0/2^2$
- Après 3T ; A.R est : $A_3 = A_2/2 = A_0/8 = A_0/2^3$
- Après nT; A.R est : $A_n = A_0/2^n$
- Après 10T, A.R est: $A_{10} = A_0 / 2^{10} = A_0 / 1024$ ++++
- Après un temps de décroissance $t \neq T$:

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

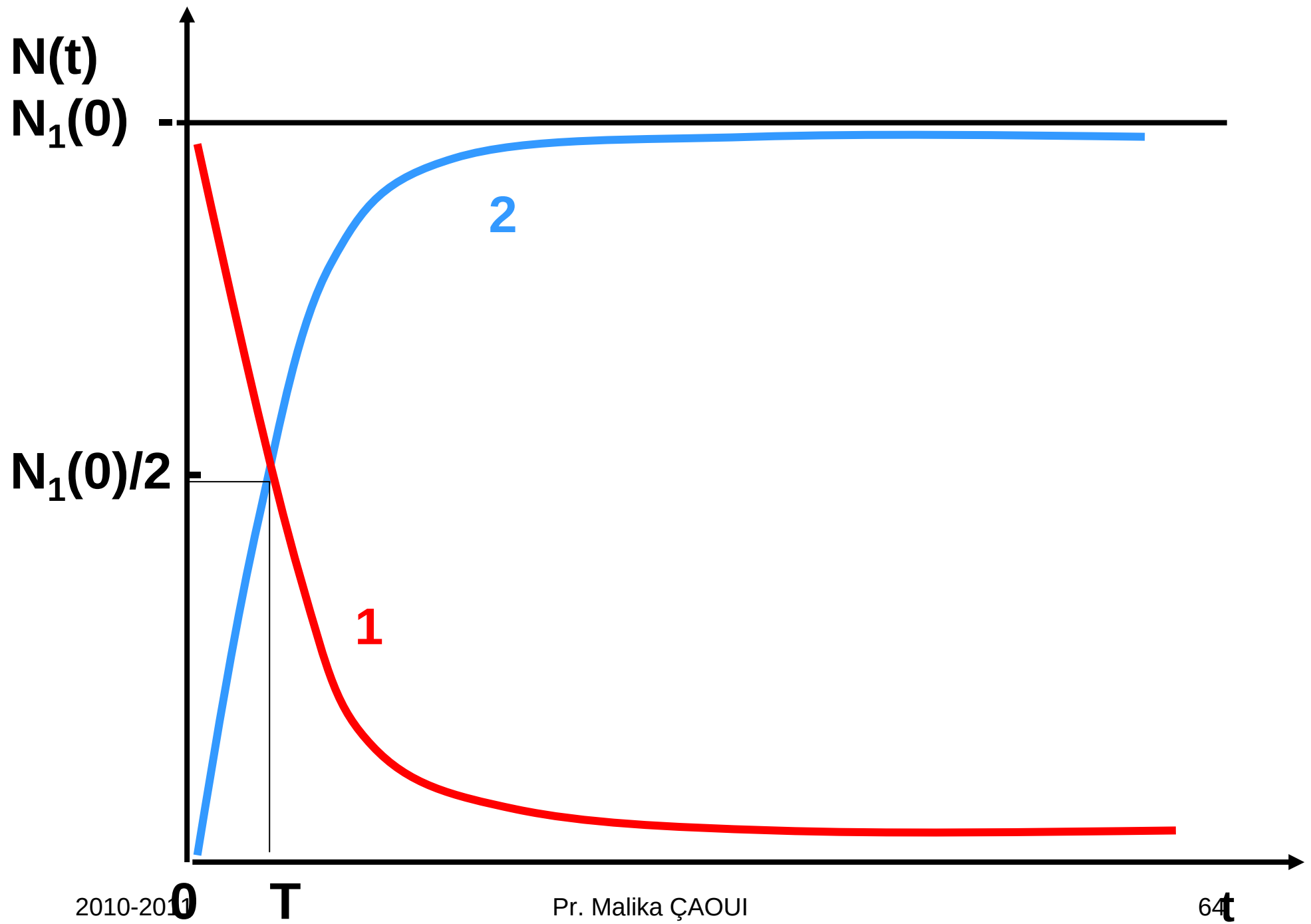
Les filiations radioactives

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

- *Cas d'un élément en filiation*

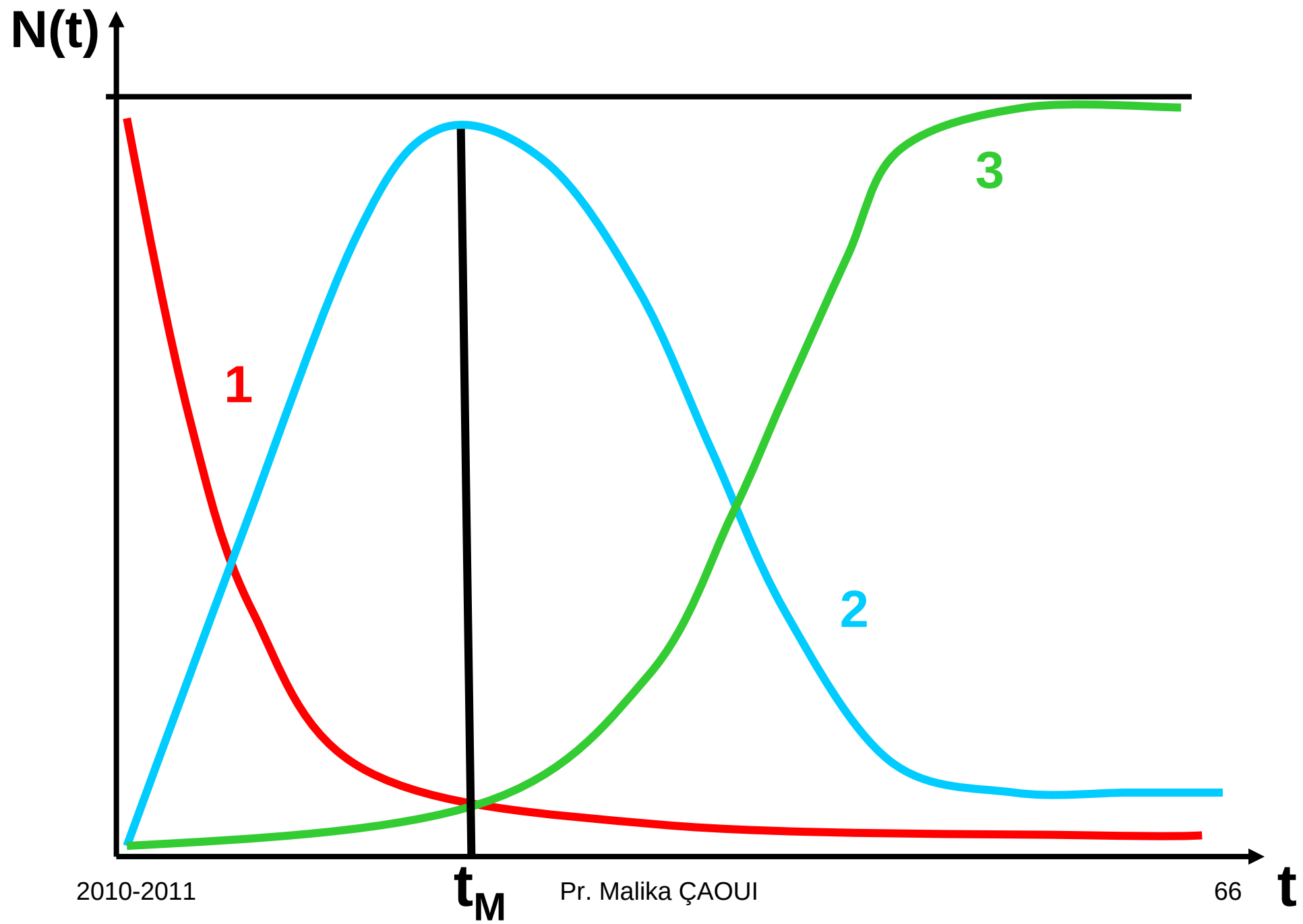


- Cte* λ_1 $\lambda_2 = 0$
- $t = 0$ $N_1(0)$ $N_2(0)$
- $N_1(t) ?$ $N_2(t) ?$
- $dN_1/dt = -\lambda_1 N_1$: l'élément (1) 
- $dN_2/dt = +\lambda_1 N_1$ (2) : au même taux 

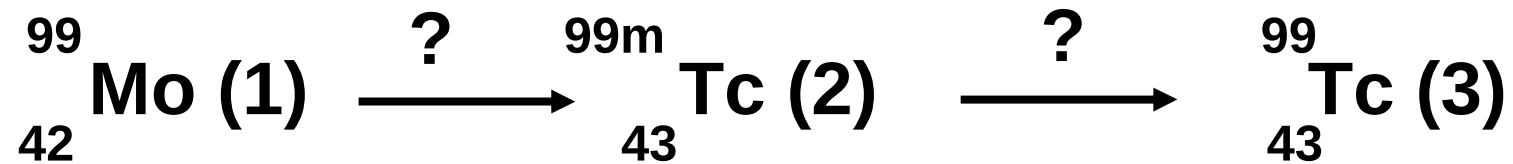


Cas de 2 éléments en filiation

- | | | | | | |
|---------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-----------------|
| | (1) | | (2) | | (3) Stable |
| • Cte* | λ_1 | $\longrightarrow$ | λ_2 | $\longrightarrow$ | $\lambda_3 = 0$ |
| • N (0) | $N_1(0)$ | $\longrightarrow$ | $N_2(0)$ | $\longrightarrow$ | $N_3(0)$ |
- On cherche : $N_1(t)$; $N_2(t)$; $N_3(t)$
 - $dN_1/dt = -\lambda_1 N_1$
 - $dN_2/dt = +\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$
 - $dN_3/dt = +\lambda_2 N_2$



Exemple important +++



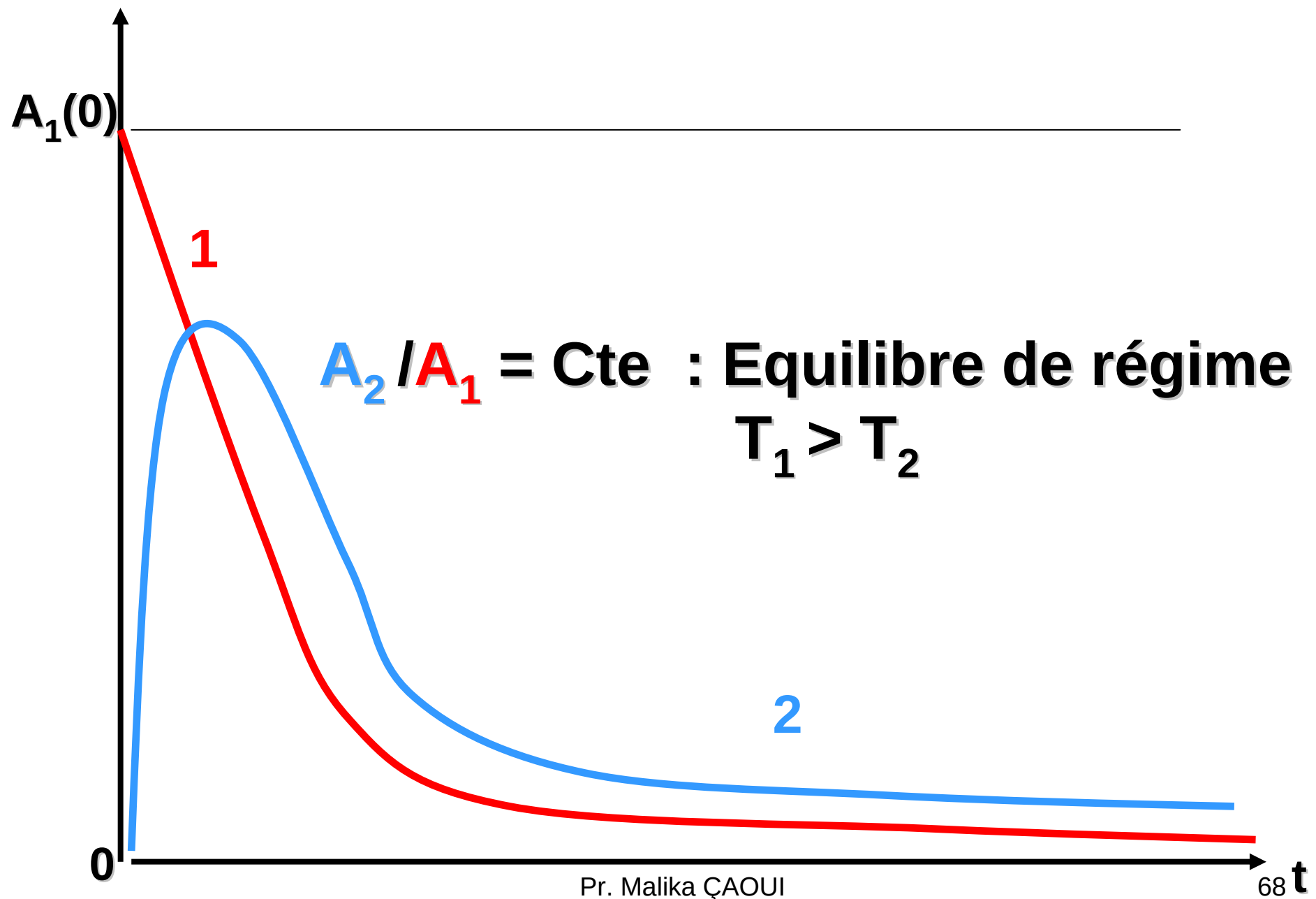
$$T_1 = 67\text{h}$$

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

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

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

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



Pr. Malika ÇAOUI

Références bibliographiques

- www.cnebm.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^{ème} session de l'UNSCEAR, 2006, supplément N° 46.
- Quelques Sites universitaires francophones Ex :
 - www.chu-rouen.fr/
 - [www.univ-nantes.fr/..](http://www.univ-nantes.fr/)
 - <http://www.cvc.u-psud.fr>
 - www.univ-angers.fr/
 - [www.med.univ-rennes1.fr.](http://www.med.univ-rennes1.fr)