

CGEA: « Matinées de Formation et de Veille Scientifique et Technologique »

Emmanuelle Galichet

Enseignante-chercheure Sciences et Technologies Nucléaires

Le Cnam



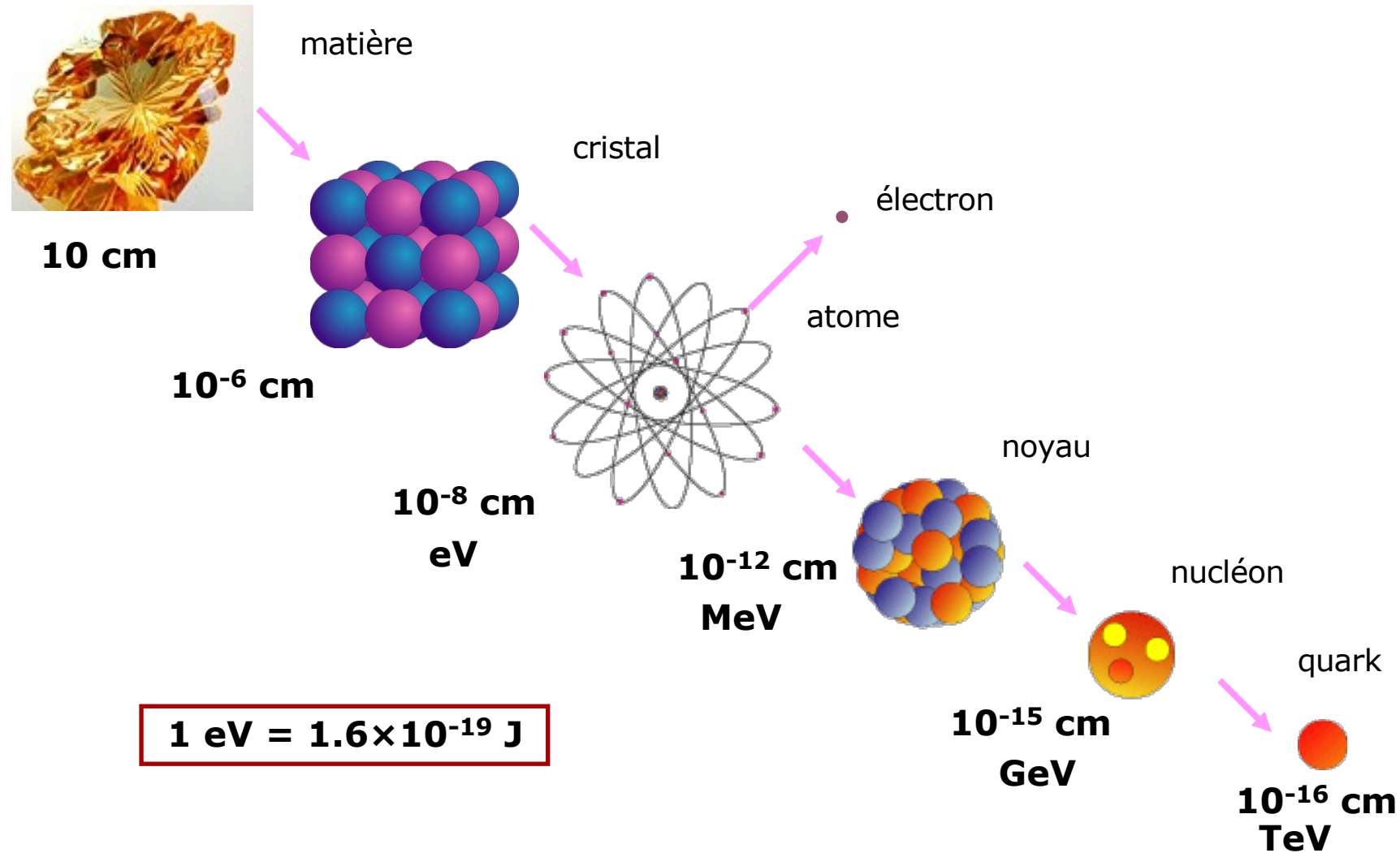
Sommaire

- ❑ Séminaire n°1 : Introduction à la Physique Nucléaire
- ❑ Séminaire n°2 : Réacteurs Nucléaires
- ❑ Séminaire n°3 : Cycle du Combustible
- ❑ Séminaire n°4 : Nouveaux Types de Réacteurs
- ❑ Séminaire n°5 : MIX Énergétique dans le Contexte du Réchauffement Climatique

Introduction à la Physique Nucléaire

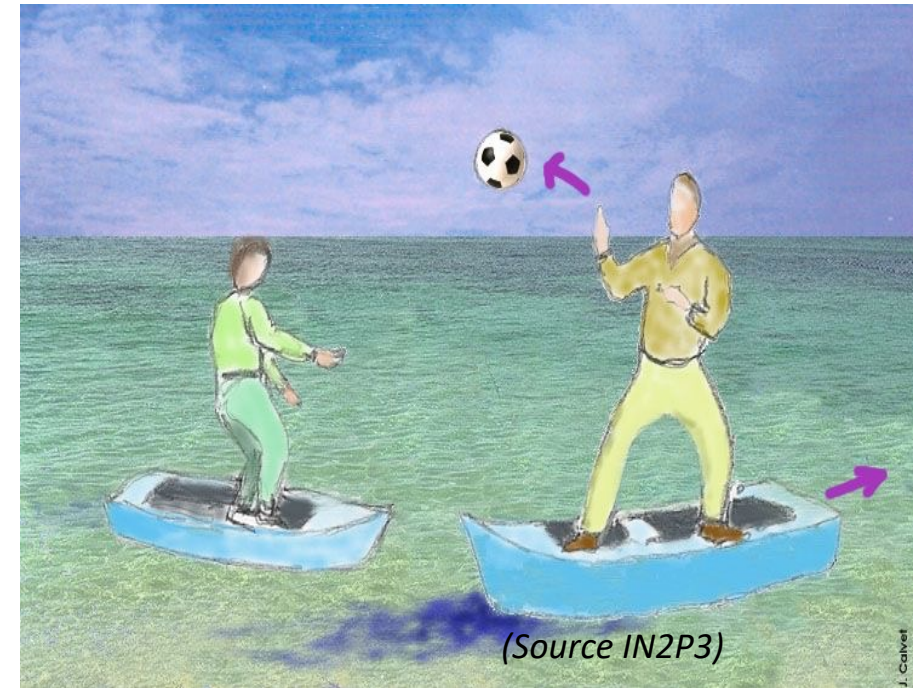
- ❑ Introduction
- ❑ L'atome, le noyau, les radionucléides, les photons
- ❑ Période et Activité
- ❑ Les différents modes de désintégration

Constitution de la matière

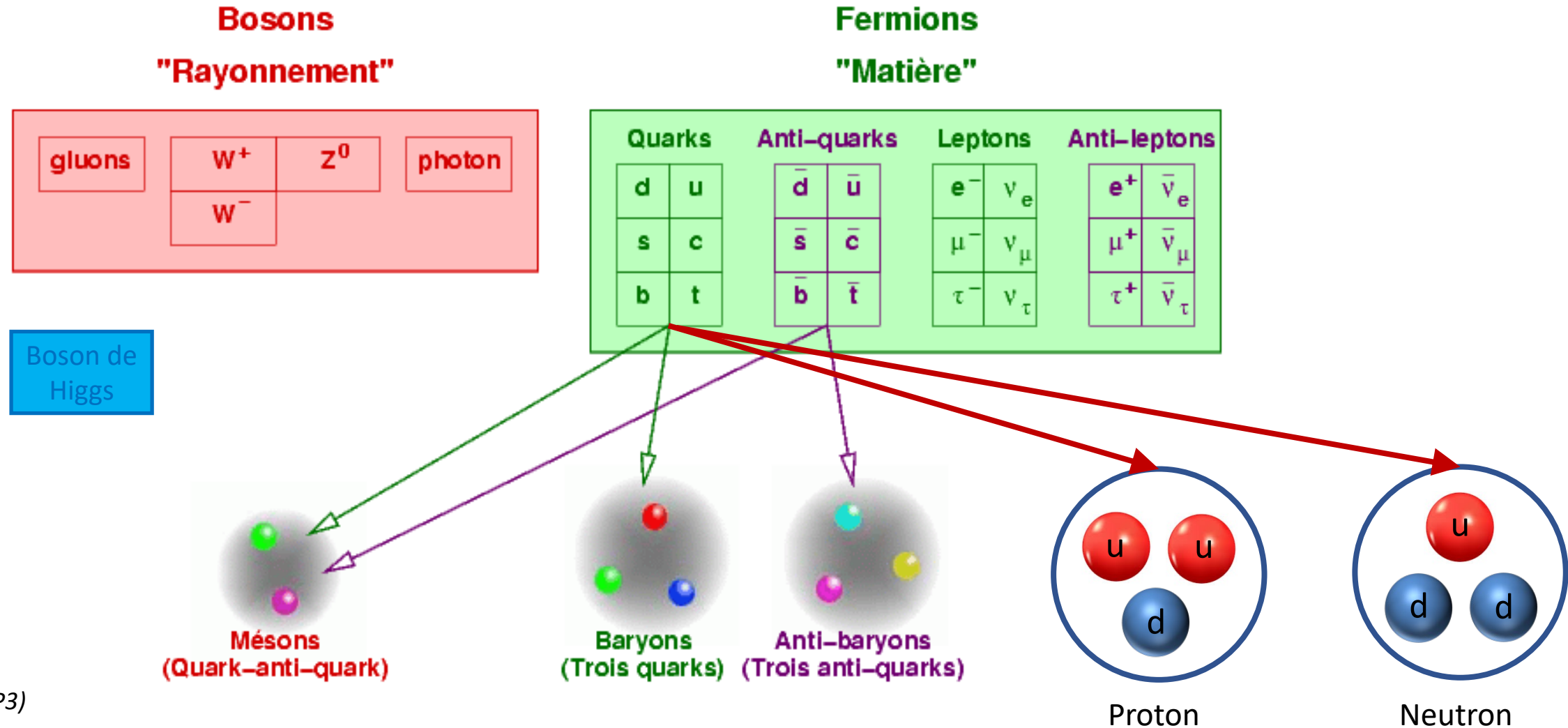


Description universelle des interactions

- ❑ Une interaction lie deux “objets” par l’intermédiaire d’un médiateur, appelé le vecteur de l’interaction ou boson.
- ❑ Plus le vecteur d'une interaction sera lourd, plus cette interaction sera de courte portée.
- ❑ Les 4 interactions fondamentales peuvent être décrites suivant ce modèle, pour permettre leur unification dans un modèle unique.
- ❑ Aujourd’hui les 3 interactions sauf la gravitation sont décrites comme l’échange de particules de rayonnement, entre particules de matière.
- ❑ La théorie qui décrit la gravitation est la relativité générale, celle qui décrit les trois autres est le modèle standard.
- ❑ Pour décrire l’ensemble des phénomènes mettant en jeu la matière connue sont nécessaires :
 - 24 particules élémentaires (12 fermions et 12 bosons)
 - Le boson de Higgs



Les particules d'intérêt en physique nucléaire

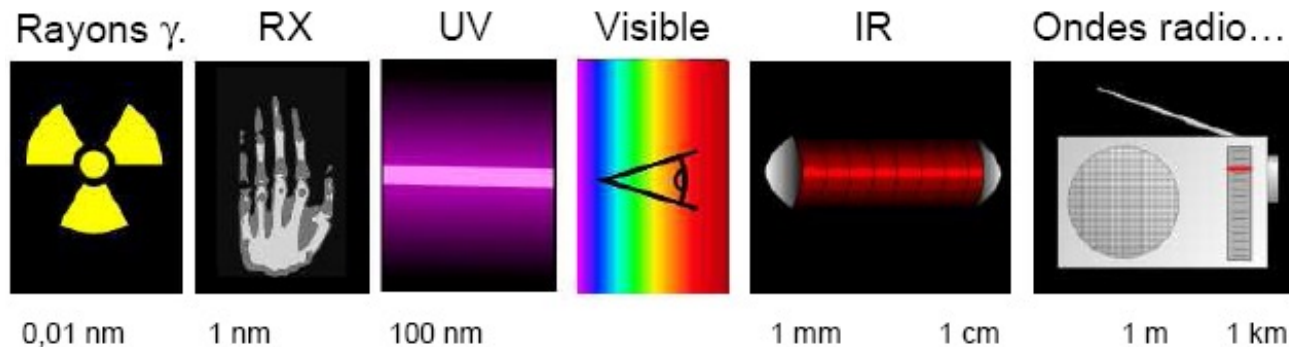


(Source IN2P3)

Le photon ou rayonnements électromagnétiques

- ❑ Il ne possède pas de charge ni de masse.
- ❑ Il se déplace dans le vide à la vitesse de la lumière.
- ❑ Un photon est caractérisé par :
 - Leur longueur d'onde dans le vide : λ (m) ou Leur fréquence : $\nu = c/\lambda$ (Hz)
 - Leur énergie : $E = h\nu = hc/\lambda$ (eV ou J)
- ❑ On distingue :
 - les photons X : émis par l'atome ($E_X \approx eV$)
 - les photons γ : émis par le noyau ($E_\gamma \approx MeV$)

Rayonnements ionisants Rayonnements non ionisants



Les unités en physique nucléaire

- ❑ Longueur: le femtomètre ou le fermi (fm) : $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ (rayon noyau \sim quelques fermis)

- ❑ Surface: le barn (b) : $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 10^{-24} \text{ cm}^2$ (section noyau \sim 1 barn)

- ❑ Energie: l'électron-volt (eV) : $1 \text{ eV} = 1,602189 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - 1 keV = 10^3 eV
 - 1 MeV = 10^6 eV (énergie d'une fission \sim 200MeV)
 - 1 GeV = 10^9 eV

- ❑ Masse: unité de masse atomique (u) : $1 \text{ u} = 1,6605656 \times 10^{-27} \text{ kg}$
(définition : $1 \text{ u} = 1/12$ de la masse du carbone-12)

Constantes et grandeurs

☐ Constantes:

- vitesse de la lumière : $c = 2,99792 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1} \approx 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- nombre d'Avogadro : $\mathcal{N} = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- constante de Planck : $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
- constante de Boltzmann : $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

☐ Grandeurs importantes:

- masse de l'électron : $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} = 5,48 \times 10^{-4} \text{ u}$
- masse du proton : $m_p = 1,6726485 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,00727 \text{ u}$
- masse du neutron : $m_n = 1,6749543 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,00866 \text{ u}$
- charge électrique de l'électron : $e = 1,60218 \times 10^{-19} \text{ C}$

Principe d'équivalence masse-énergie

- Albert Einstein le postula en 1905.

« Tout corps au repos possède du seul fait de sa masse, une énergie $E=mc^2$ appelée énergie de masse. »



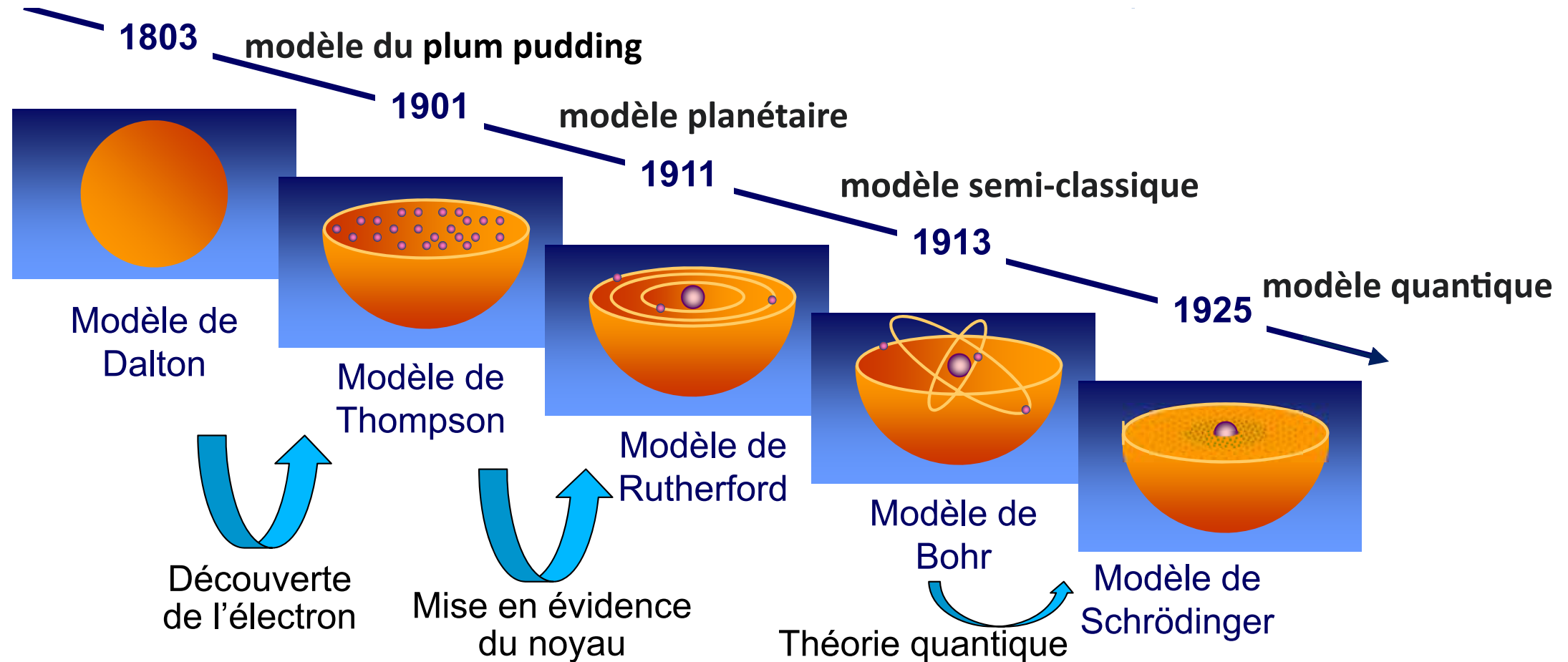
La matière qui constitue toute particule
peut être une source d'énergie.

- L'énergie de masse correspondant à une masse de 1 u :

$$E = \frac{1,6605656 \times 10^{-27} \times (2,99792 \times 10^8)^2}{1,6 \times 10^{-13}} = 931,5 \text{ MeV}$$

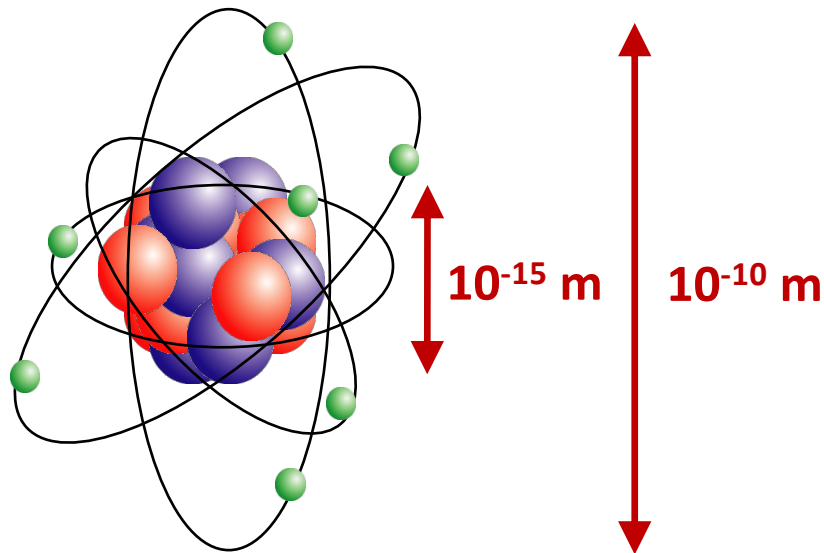
vitesse de la lumière dans le vide

Les différents modèles de l'atome

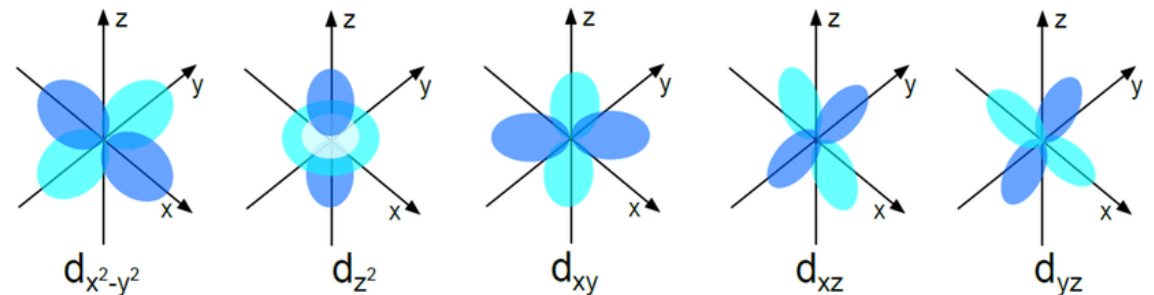


Description simplifiée de l'atome

- ❑ Atome : ensemble (protons + neutrons + électrons)
- ❑ Ensemble électriquement neutre
- ❑ Dimension: $\approx 10^{-10} \text{ m}$



- ❑ Modèle quantique de l'atome: Schrödinger (1926)
- ❑ **A chaque électron est associée une fonction d'onde.**
- ❑ Le mouvement de l'électron autour du noyau suit une équation différentielle linéaire du second ordre.
 - ➔ Équation de Schrödinger
- ❑ Les solutions permettent de déterminer la probabilité p de présence de l'électron autour d'un noyau.
- ❑ Orbitale atomique = région de l'espace où p est élevée



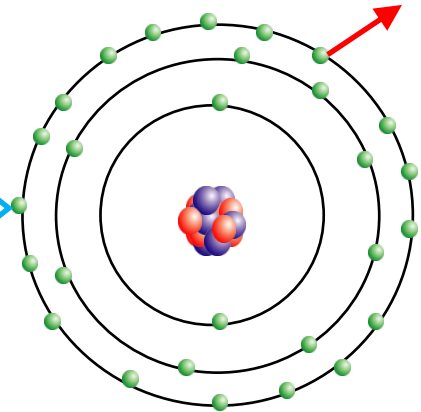
Transitions électroniques

□ Si l'atome reçoit de l'énergie du milieu extérieur, 2 cas se présentent :

1. L'énergie est suffisante ($E > E_{\text{ion}}$) pour arracher l'électron de l'atome :

➔ C'est l'ionisation de l'atome

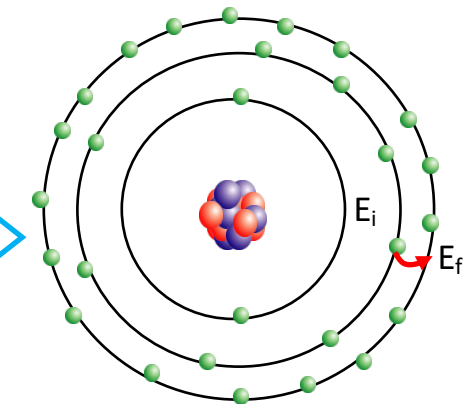
Rayt



2. L'énergie est insuffisante ($E < E_{\text{ion}}$) pour éjecter l'électron de l'atome :

➔ C'est l'excitation de l'atome

Rayt




La différence d'énergie entre les deux états final et initial :



$$E_f - E_i = h\nu$$

photon d'énergie $h\nu$

Les grandeurs du noyau atomique

- ❑ Un noyau est constitué de **nucléons** (protons et neutrons).
 - ❑ Ses dimensions sont de l'ordre de 10^{-15} m, correspondant à 0,01% des dimensions de l'atome. Par conséquent la densité de la matière nucléaire est énorme (environ 230 000 tonnes / mm^3).
 - ❑ La charge du noyau est positive.
 - ❑ La cohésion du noyau est assurée par l'interaction forte.
 - ❑ Pour représenter l'attraction entre nucléons est définie l'énergie de liaison, qui peut être définie à partir de modèles différents, plus ou moins sophistiqués.
-  Plus E_{liai} est grande plus le noyau sera lié et stable.
- ❑ La notation utilisée pour les atomes est valable pour les noyaux :



xénon – 133 : ${}_{54}^{133}\text{Xe}_{79}$

uranium – 235 : ${}_{92}^{235}\text{U}_{143}$

- X= symbole chimique de l'élément auquel le noyau appartient
- A = nombre de masse = nombre de protons + nombre de neutrons
- Z = numéro atomique = nombre de protons

Quelques définitions

- ❑ Élément (chimique): Ensemble des atomes avec le même Z.
- ❑ Nucléide: Ensemble des atomes ayant des noyaux identiques (même valeur de Z et A).

114 éléments connus



regroupant 3000 nucléides environ

dont 256 stables

- ❑ Isobares: Nucléides avec A identique : ${}^{239}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{93}\text{Np}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$



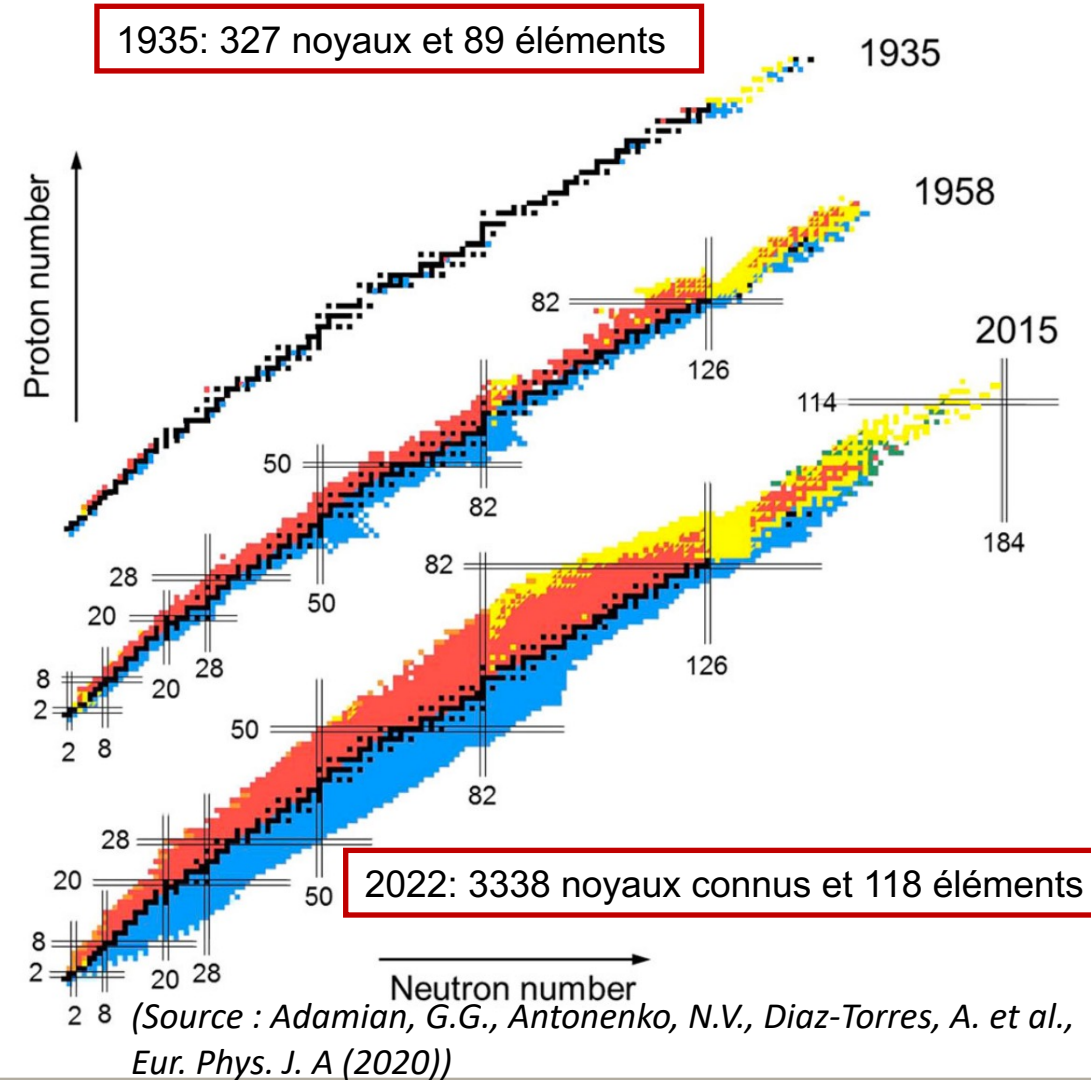
relèvent d'éléments chimiques différents.

- ❑ Isotopes: Nucléides avec le même Z : ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^3_1\text{H}$

- ❑ Isotones: Nucléides possédant le même N : ${}^{60}_{27}\text{Co}$, ${}^{61}_{28}\text{Ni}$, ${}^{62}_{29}\text{Cu}$

- ❑ Isobares: Nucléides avec le même A : ${}^3_1\text{H}$ et ${}^3_2\text{He}$. Ils ont souvent des propriétés nucléaires semblables.

- ❑ Isomères: Nucléides de même A et Z (structure identique) se trouvant dans des états énergétiques différents.



Volume du noyau

Les trois propriétés statiques des noyaux :

1. Rayon (et donc volume)
2. Masse (et donc énergie)
3. Energie de liaison (et donc masse)

Le **volume** du noyau est un million de milliards de fois plus petit que celui de l'atome.

1^{ère} approximation : le noyau est de forme sphérique et de volume incompressible.

Le volume du noyau d'hydrogène est noté V_0 :



$$V_0 = \frac{4}{3} \pi r_0^3$$

Avec $r_0 = 1,2 \text{ fm}$

Dans une loi approximative, on considère que le volume du noyau est proportionnel au nombre de nucléons qui composent le noyau :

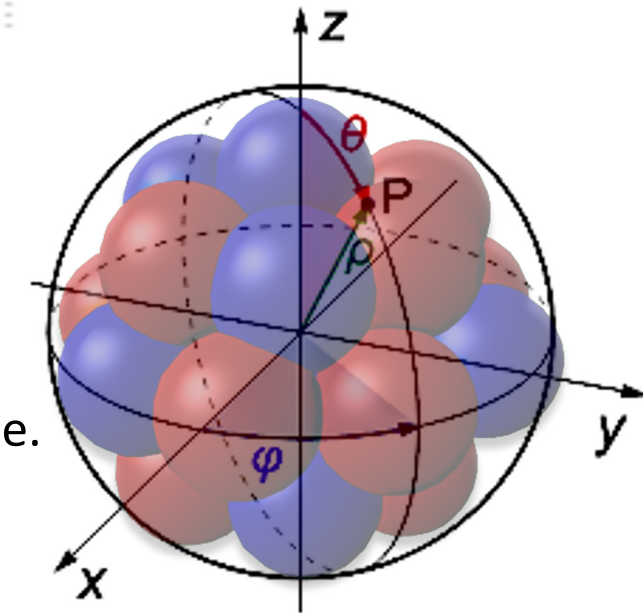


$$V = A \times V_0$$



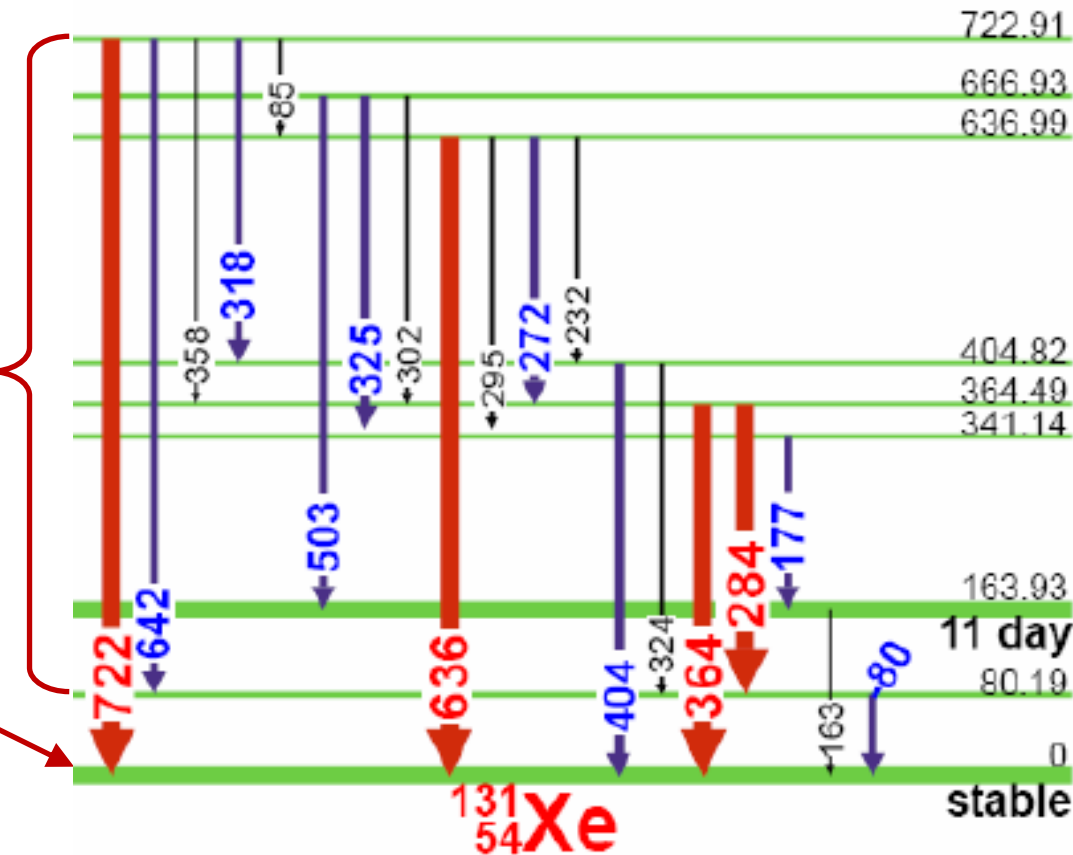
$$r = r_0 \times A^{1/3}$$

Par exemple : $r(^4\text{He}) = 1,9 \text{ fm}$; $r(^{56}\text{Fe}) = 4,5 \text{ fm}$; $r(^{238}\text{U}) = 7,4 \text{ fm}$



Quelques remarques

- ❑ Le couple (A, Z) ne détermine pas de façon unique l'état d'un noyau atomique.
- ❑ Un noyau (A,Z) possède :
 - un état fondamental
 - un spectre d'états excités.
- ❑ Les états excités du noyau (A,Z) se désexcitent vers l'état fondamental en émettant des photons gamma.
- ❑ Les durées de vie de ces états excités sont de l'ordre de 10^{-12} s.
- ❑ Cela se comprend dans le cadre du modèle en couches du noyau.



L'énergie de liaison d'un noyau

□ L'énergie de liaison d'un système se définit comme la différence entre la masse totale des constituants et celle du système.

□ Pour le noyau, $E_{\text{liais}}(A,Z)$ est égale à :

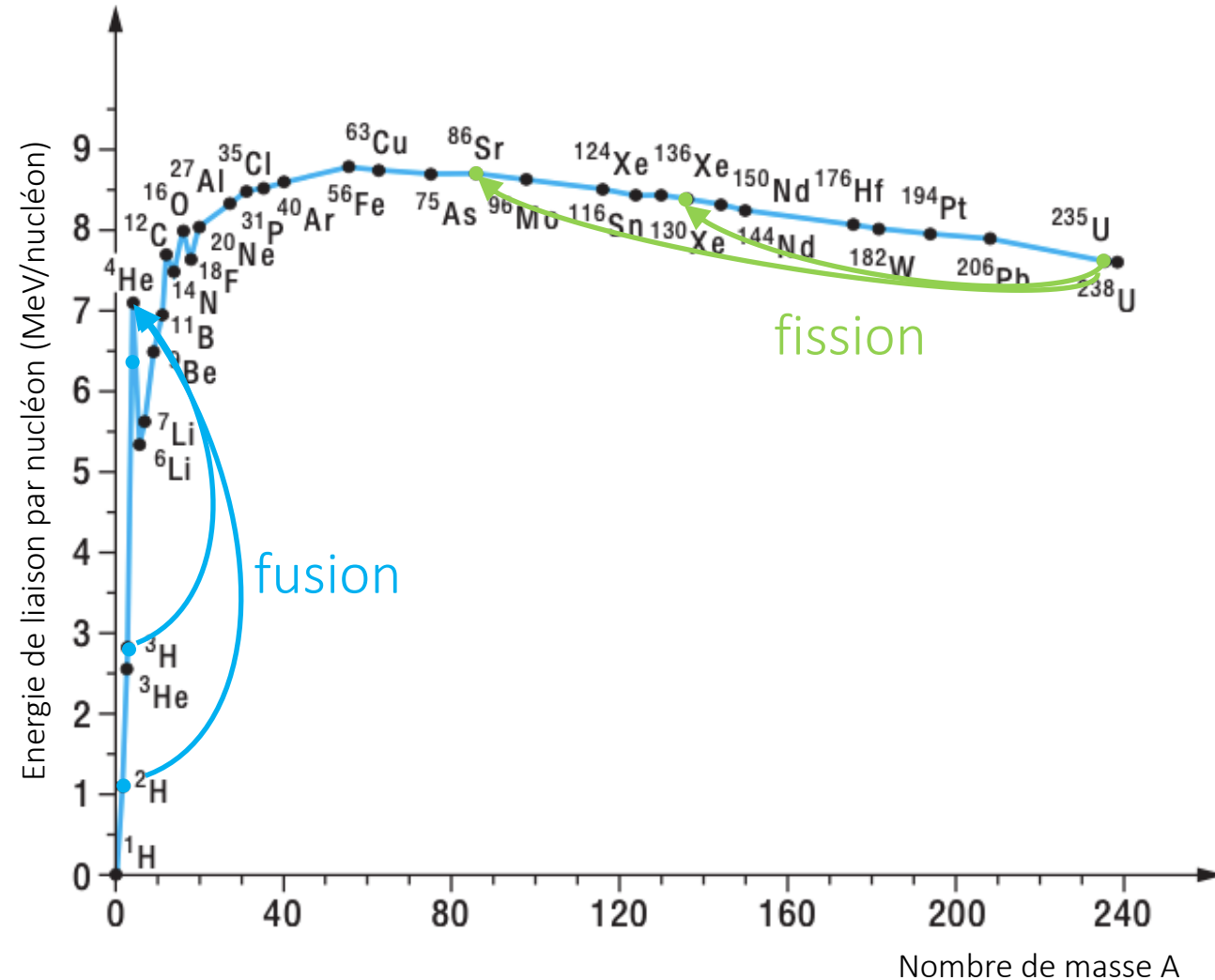
$$E_{\text{liais}}(A, Z) = [N \times m_n + Z \times m_p - M(A,Z)] \times c^2$$

□ Par le principe de correspondance masse-énergie :

$$E_{\text{liais}}(A,Z) = \Delta m \times c^2 \quad \Delta m = \text{défaut de masse}$$

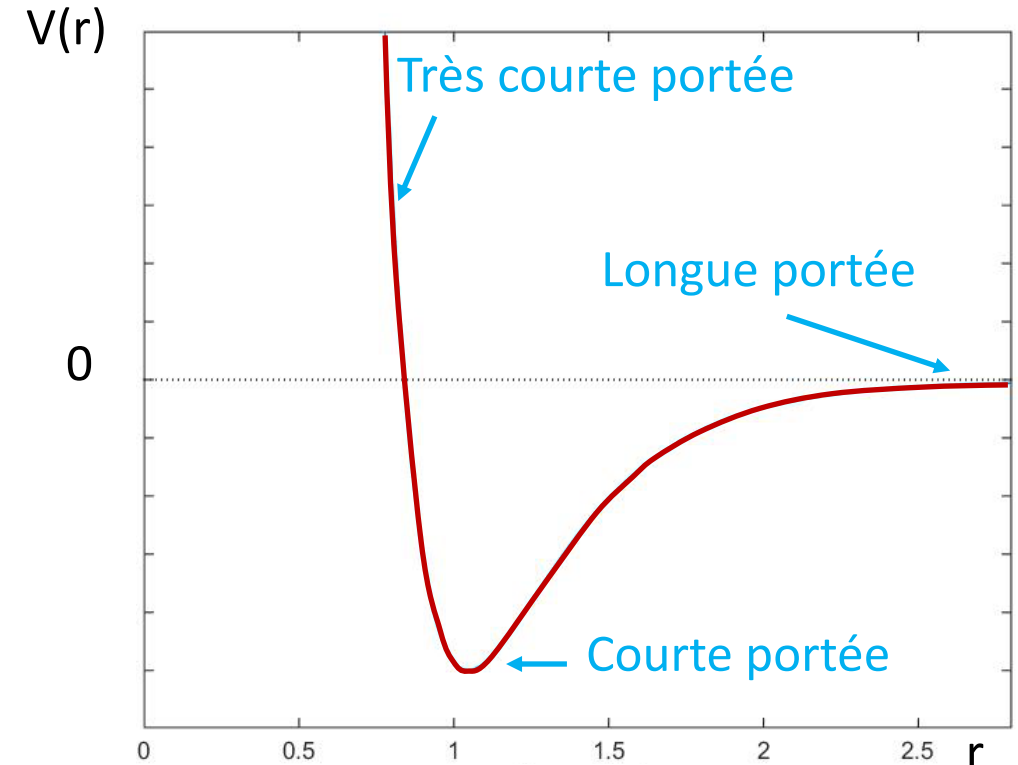
□ Pour comparer les noyaux entre eux est utilisée l'énergie de liaison par nucléon : E_{liais}/A

Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est grande



L'interaction entre deux nucléons

- ❑ Interaction attractive, d'intensité importante ($>$ à l'interaction électromagnétique entre les protons), de courte portée (~ 1 fm).
- ❑ On admet que l'interaction entre deux nucléons se traduit par l'existence d'une énergie potentielle, que l'on peut représenter graphiquement par un puits de potentiel :
 - attractif à courte portée,
 - très répulsif à très courte portée,
 - au-delà d'environ 1,5 fm, le caractère attractif décroît de manière exponentielle vers zéro.



Introduction aux modèles nucléaires

- ❑ Comment décrire le noyau?

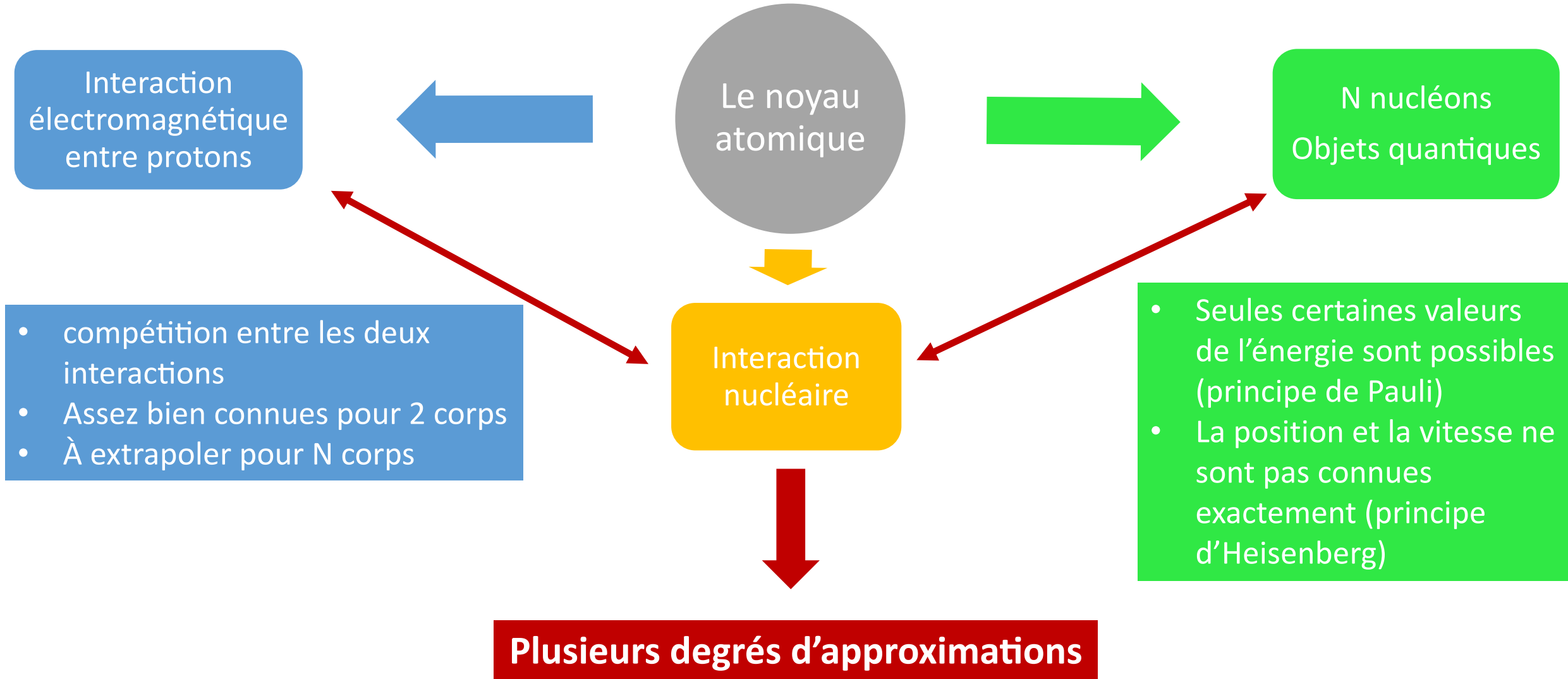
C'est un système de N nucléons en interaction



Le comportement de chaque nucléon influence
les $N-1$ autres nucléons du système

- ❑ Le problème majeur d'une description théorique satisfaisante du noyau atomique est notre incapacité encore aujourd'hui à traiter correctement et sans approximation le problème à N corps.
- ❑ Seuls les problèmes à 2 et 3 corps possèdent des solutions exactes.
- ❑ De nombreuses techniques existent pour résoudre de manière approchée le problème à N corps.

Introduction aux modèles nucléaires



Le champ moyen

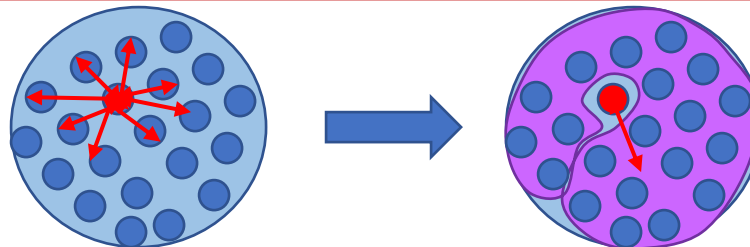
C'est un système de N nucléons en interaction



Le comportement de chaque nucléon influence les $N-1$ autres nucléons du système



Simplification du problème à N corps: le champ moyen



Le modèle de la goutte liquide

- ❑ Les nucléons du noyau sont assimilés à des molécules d'une goutte d'eau.
- ❑ Le noyau est décrit classiquement à travers un volume, une masse et une énergie de liaison.
- ❑ Etabli par Von Weizsäcker et Niels Bohr (≈ 1937).
- ❑ Il permet de rendre compte des propriétés générales des noyaux (rayons, masses et énergies de liaison).
- ❑ Les paramètres de ce modèle sont ajustés sur les données expérimentales.
- ❑ Les hypothèses de base sont:
 - le noyau est sphérique et incompressible
 - dans le noyau, la densité volumique de charge $\rho(r)$ est constante.
- ❑ Elle prend en compte deux termes décrivant des effets quantiques :
 - un terme d'asymétrie qui est nul quand $N=Z$,
 - un terme d'appariement qui favorisent les configurations où deux fermions identiques sont appariés.

La formule de Bethe et Weizsäcker

$$E_i(A, Z) = \underbrace{a_{\text{vol}} A}_{\text{Terme de volume}} - \underbrace{a_{\text{surf}} A^{2/3}}_{\text{Terme de de surface}} - \underbrace{a_{\text{coul}} \frac{Z^2}{A^{1/3}}}_{\text{Terme de coulomb}} - \underbrace{a_{\text{asym}} \frac{(N-Z)^2}{A}}_{\text{Terme d'asymétrie}} + \left\{ \begin{array}{l} a_p / \sqrt{A} \text{ (pair - pair) *} \\ 0 \text{ (pair - impair)} \\ - a_p / \sqrt{A} \text{ (impair - impair)} \end{array} \right\}$$

Terme de volume
Terme de de surface
Terme de coulomb
Terme d'appariement

Dus au modèle de la goutte liquide

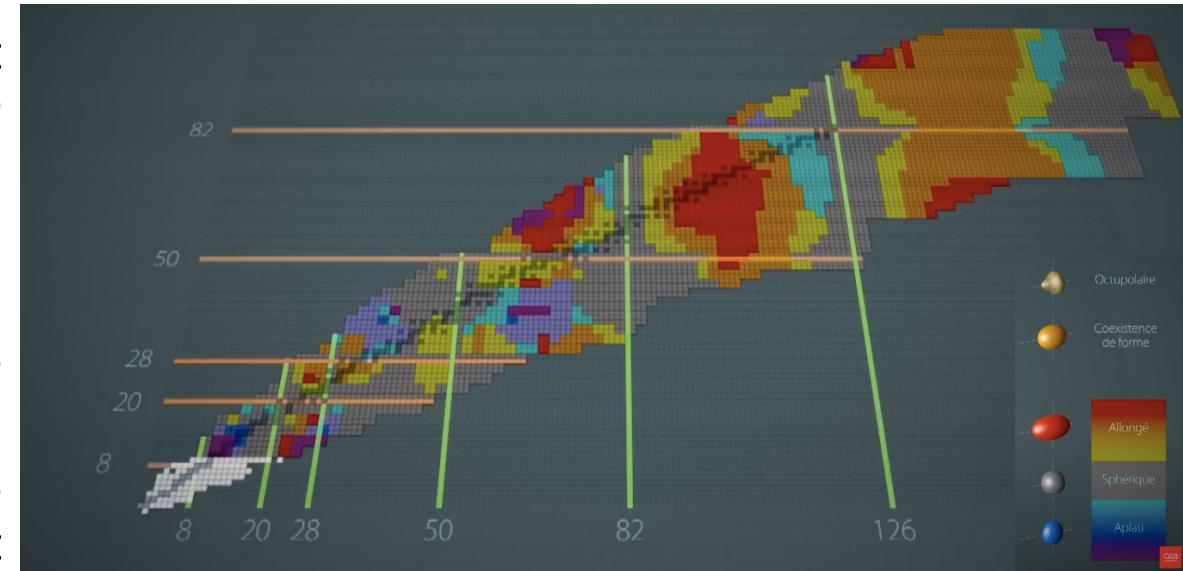
Répulsion coulombienne entre protons

Dus à la mécanique quantique

* Z et N pairs ou impairs

Les nombres magiques

- ❑ Les nombres magiques sont des nombres de nucléons pour lesquels les noyaux sont beaucoup plus stables que leurs voisins.
- ❑ Ce sont des observations expérimentales, qui ont conduit les théoriciens à construire leur modèle pour reproduire les nombres magiques.
- ❑ La séquence est la suivante: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126...
- ❑ Dans le modèle en couches, cela correspond à un arrangement en couches complètes: fermeture de couches.
- ❑ Un noyau ayant un nombre magique de neutrons et de protons sera encore plus stable: il est appelé doublement magique. C'est le cas du plomb-208 (82 protons et 126 neutrons).
- ❑ Ces noyaux magiques ont une énergie de liaison par nucléon plus élevée que celle prédite par la formule de Weizsäcker.



(Source CEA)

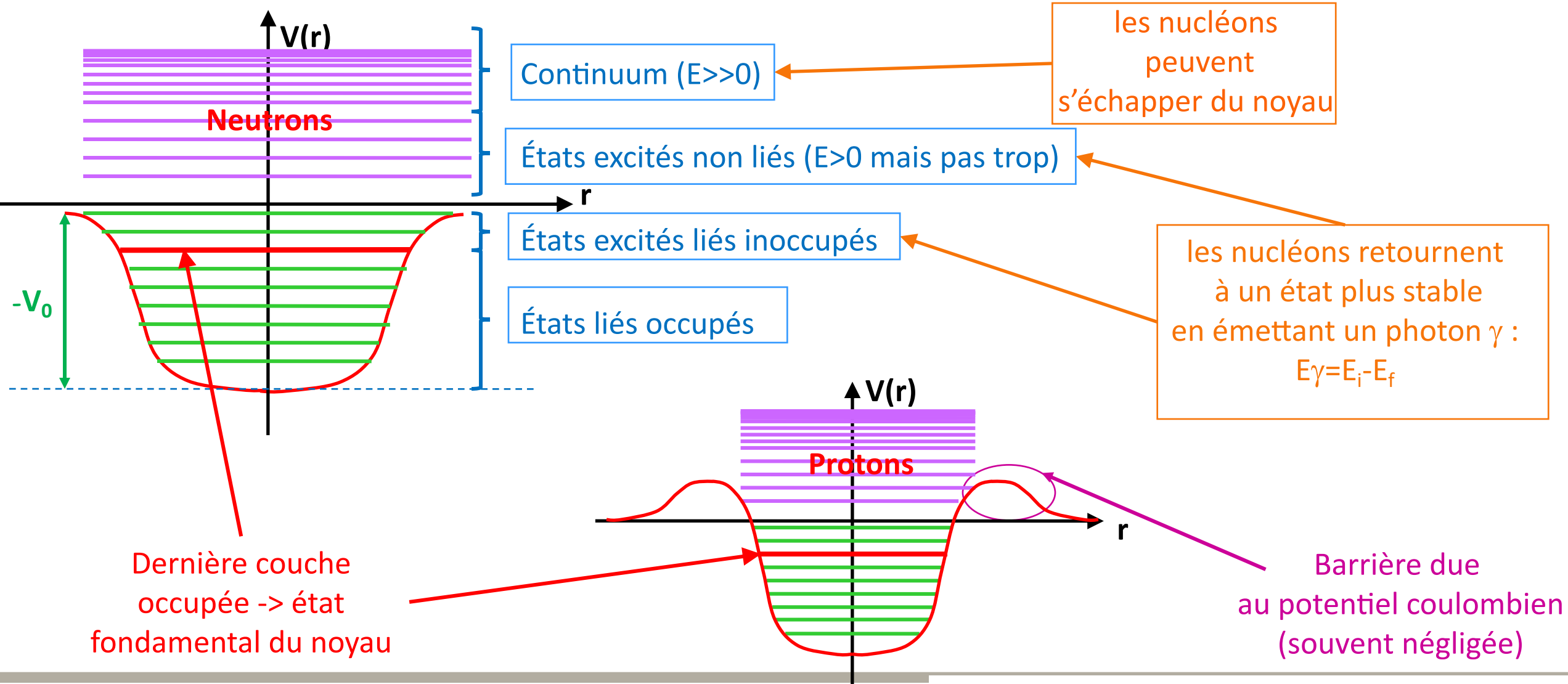
Le modèle en couches à particules indépendantes

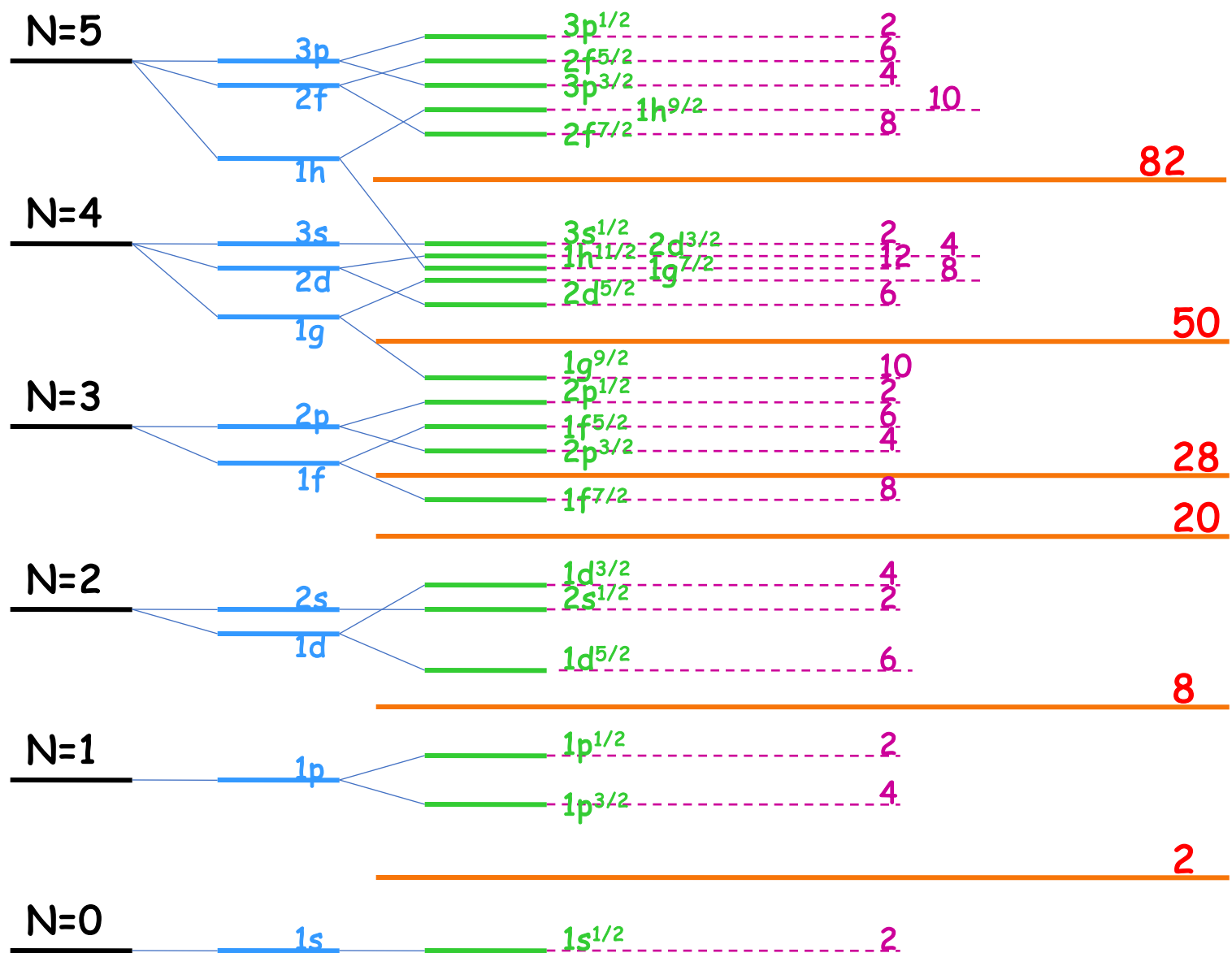
- ❑ Véritable révolution, introduit par Maria Goeppert Mayer en 1948, le modèle en couches du noyau décrit les nucléons dans le noyau de la même façon que les électrons dans l'atome.
- ❑ Ce que disait Maria Goeppert Mayer, lors de sa conférence Nobel en 1963:

"In analogy with atomic structure one may postulate that in the nucleus the nucleons move fairly independently in individual orbits in an average potential which we assume to have spherical symmetry."

- ❑ Les nucléons sont sur des couches et sentent le potentiel moyen « confinant » des autres nucléons du noyau.
- ❑ Chaque nucléon occupe un état donné indépendamment des autres (en respectant le principe de Pauli).
- ❑ Pour trouver les niveaux d'énergie d'un noyau de A nucléons, il faut résoudre le problème « simple », de l'étude des états liés d'un nucléon indépendant dans un potentiel de champ moyen.

Puits de potentiel





Couches
majeures

(n,l)

Spin-orbite

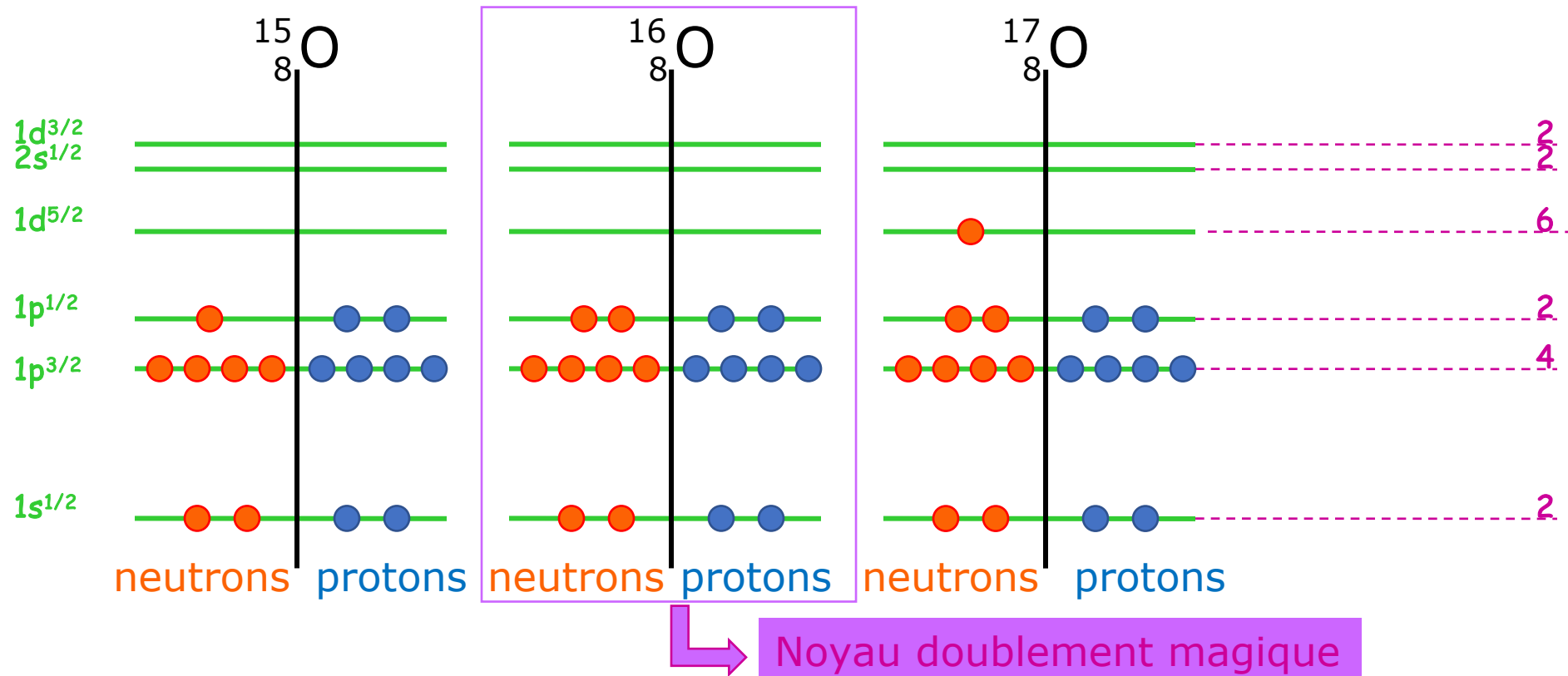
Dégénérescence
(nbre de nucléons)

Nombres magiques

Un exemple

□ Prenons l'exemple de l'oxygène, dont trois isotopes sont: ^{15}O , ^{16}O et ^{17}O :

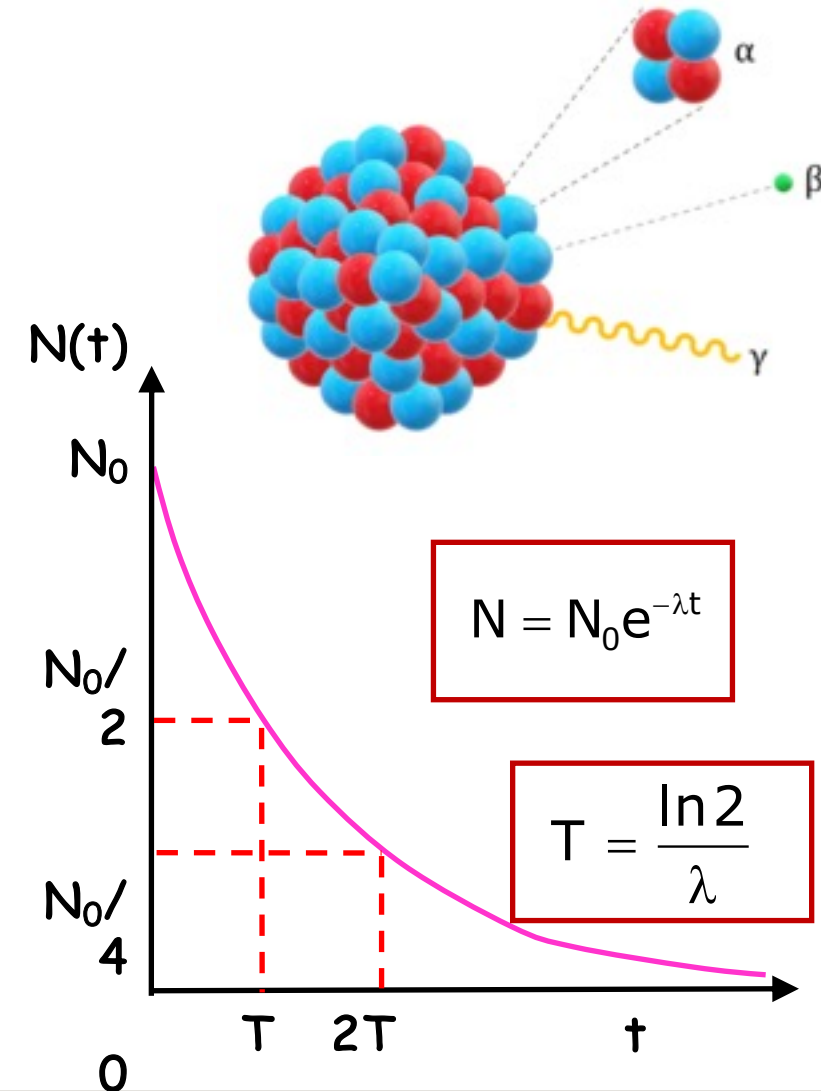
L'oxygène-15 possède 8 protons et 7 neutrons; L'oxygène-16 possède 8 protons et 8 neutrons; L'oxygène-17 possède 8 protons et 9 neutrons



Loi de désintégration radioactive

- ❑ Un radionucléide est un noyau atomique dont la durée de vie est finie. On dit qu'il est instable, car il a de l'énergie en trop.
- ❑ Il tendra spontanément à libérer cette énergie en trop en émettant un rayonnement ionisant (α , β , γ , n , ...) : c'est une désintégration radioactive.
- ❑ Le nombre de radionucléides diminue spontanément dans le temps.
- ❑ Durée de vie (période) T = durée nécessaire au bout de laquelle la moitié des radionucléides se sont désintégrés.
- ❑ λ = constante de désintégration, caractéristique du nucléide.

Radionucléide	Période T	Mode de désintégration
^{238}U	4,5 Md d'années	α
^{224}Th	24.1 jours	β^-
^{206}Tl	4.2 min	β^-



Activité

- L'activité A est égale au nombre moyen de radionucléides d'une source radioactive qui se désintègrent par seconde.



$$A = \lambda N$$

Unité le Bq: 1Bq=1 désint/s

$$A = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$$

- Une autre unité est le Curie, (plus utilisée depuis 1985): 1 Ci = 37×10^9 Bq
- A varie en $1/T$, donc plus la période du radionucléide est courte, plus son activité sera importante (pour N fixé).
- Pour une source composée de plusieurs radionucléides de constante radioactive λ_i , l'activité totale sera la somme des activités partielles:



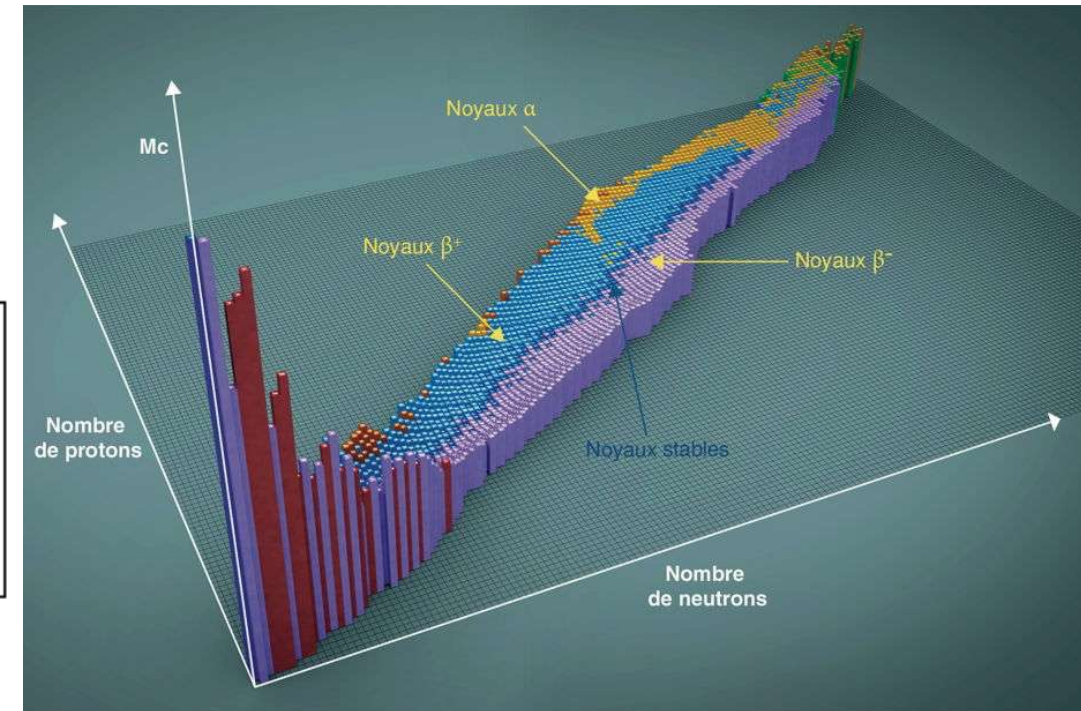
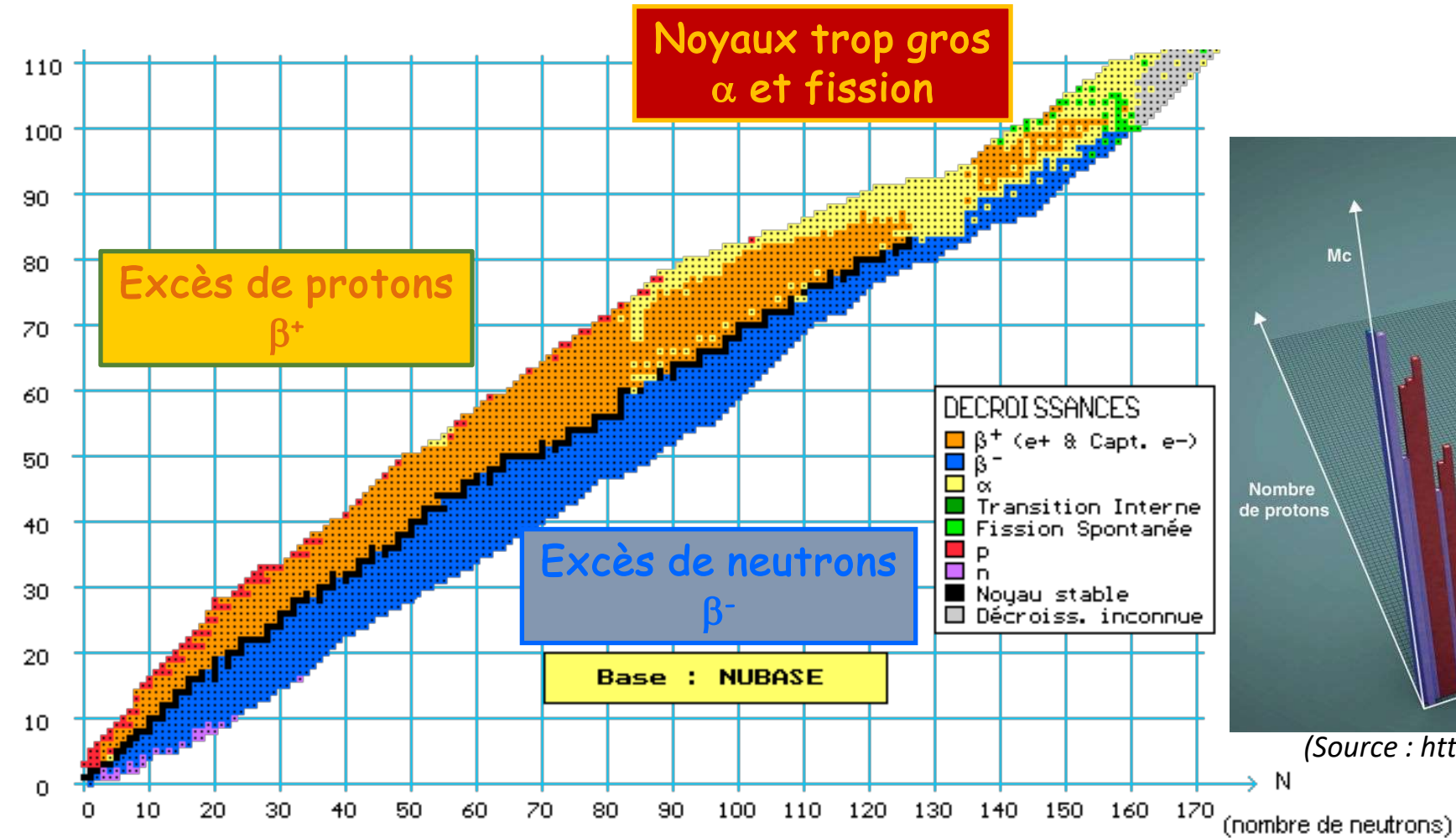
$$A_{\text{tot}} = \sum_i \lambda_i N_i$$

- Très souvent, pour comparer des sources entre elles, on rapporte l'activité d'une source radioactive à sa masse, en Bq/kg. C'est l'activité spécifique.

Ordre de grandeur

1 homme (70kg)	10000 Bq (dont ~6000 Bq dûs au potassium-40 des os, le reste est dû au carbone-14)
1 kg de café	1000 Bq
1 litre d'eau de pluie	0.3 à 1 Bq
1 litre d'eau de mer	10 Bq
1 kg de sol sédimentaire	400 Bq
1 kg de sol granitique	8000 Bq
1 kg d'engrais (phosphate)	5000 Bq
1 kg de minerai d'uranium	25 millions Bq
Radio-isotope pour les diagnostics médicaux	70 millions Bq
1 Source radioactive médicale	100 000 milliards Bq
1 kg de déchets nucléaires de haute activité (vieux de 50 ans), vitrifiés	10 000 milliards Bq

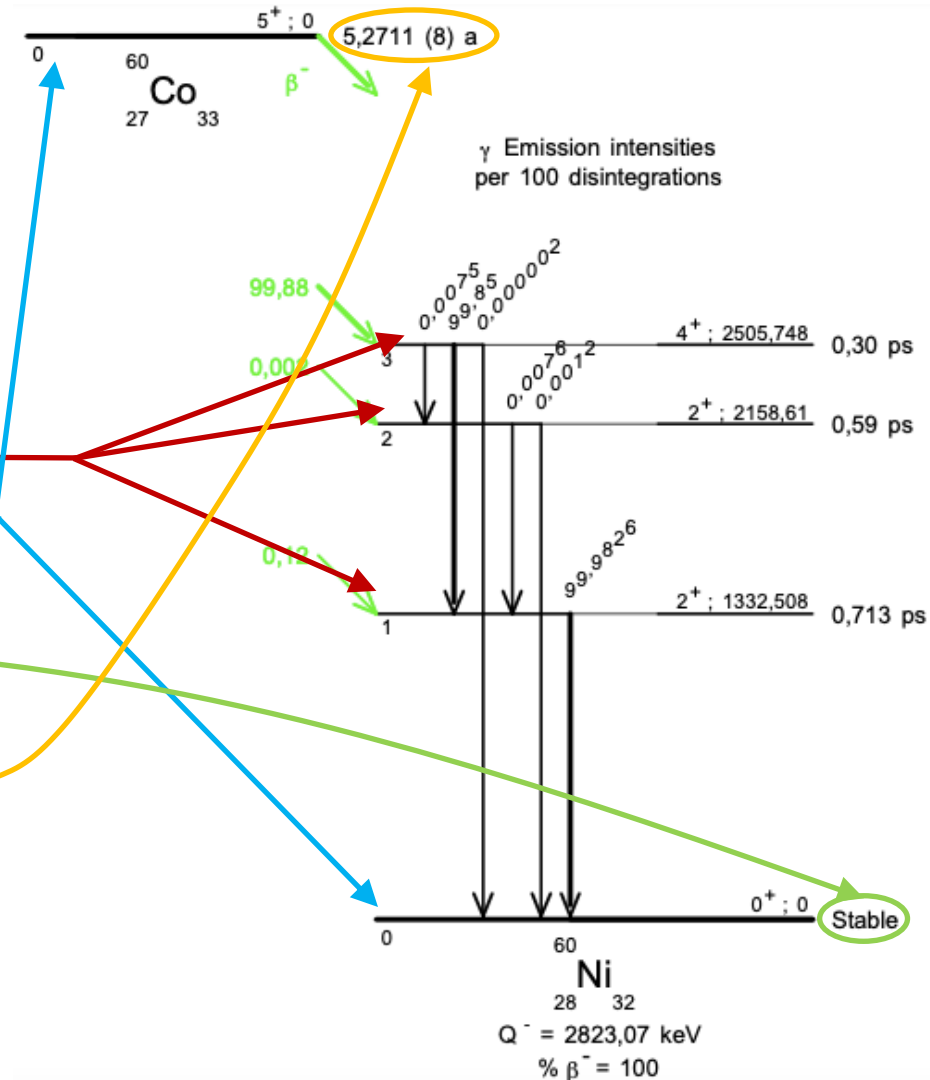
Introduction aux désintégrations radioactives



(Source : <https://www.youtube.com/watch?v=VZHpAwSGYZE>)

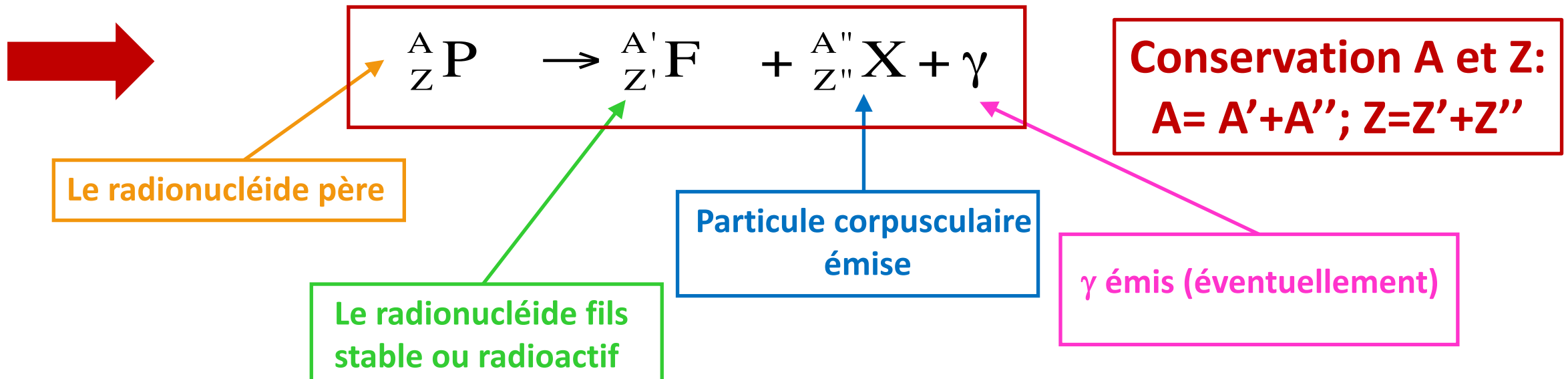
Stabilité et instabilité

- ❑ La stabilité d'un noyau atomique résulte de la compétition entre l'interaction nucléaire et l'interaction électromagnétique.
- ❑ L'évacuation du surplus d'énergie peut se faire par différentes voies de désexcitations.
- ❑ Un noyau peut être dans :
 - un état excité ,
 - son état fondamental.
- ❑ Un noyau est :
 - **stable** lorsque l'interaction nucléaire est supérieure à l'interaction em de manière pérenne. Sa durée de vie est alors infinie.
 - **instable ou radioactif** lorsque l'équilibre entre les deux interactions est fragile. Sa durée de vie est alors finie. Le noyau tendra spontanément à se transformer en un noyau stable en émettant un rayonnement: désintégration bêta, proton, neutron, alpha, fission (éventuellement associées à des photons (rayonnement gamma)).



Notations usuelles

- ❑ Le radionucléide initial est appelé le père (radionucléide parent) et le radionucléide final le fils (radionucléide descendant).
- ❑ Si plusieurs générations successives sont radioactives, on parle de chaîne de désintégration radioactive (ou décroissance) ou de filiations radioactives.
- ❑ Pour une désintégration radioactive, l'équation bilan sera:



Remarque générale

- Similitude théorique entre désintégration radioactive et réaction nucléaire :

Transition d'un état initial i vers un état final f

Si $E_i > E_f$

Spontanément

Désintégrations radioactives

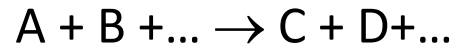
Si $E_i < E_f$

Artificiellement
(en apportant E_{ext} suffisante)

Réactions nucléaires

Energie disponible

- Tout processus peut s'écrire:



- Le bilan d'énergie est mesuré par le Q de la réaction:

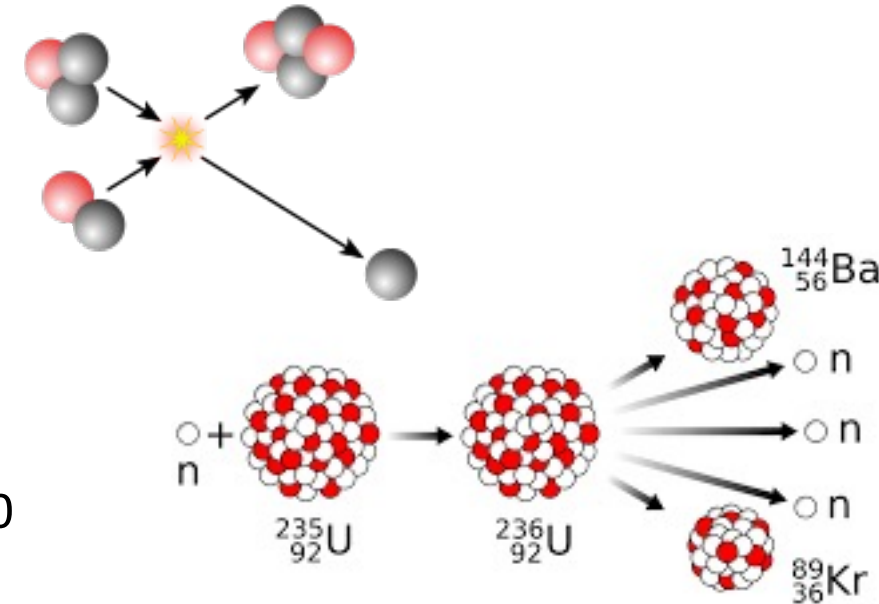
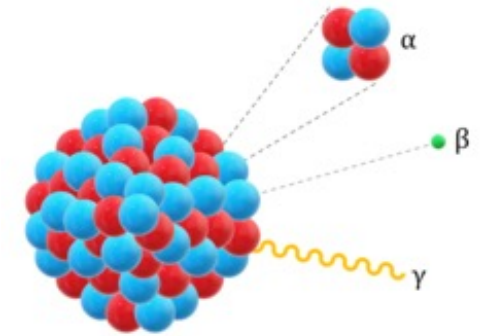
$$Q = E_A + E_B + \dots - E_C - E_D - \dots \rightarrow Q = (m_A + m_B - m_C - m_D) c^2$$



Q est l'énergie disponible ou la chaleur de réaction

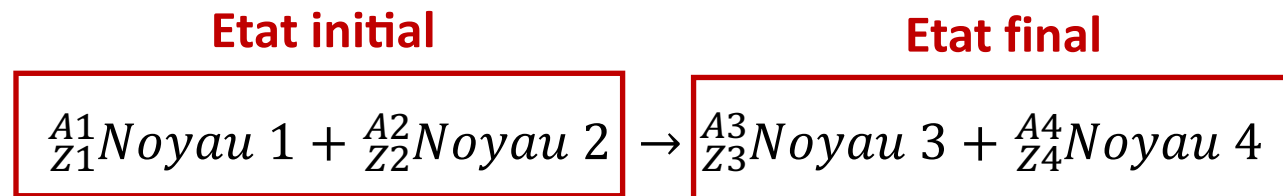
- $Q > 0$: réaction exoénergétique (libération d'énergie)
- $Q < 0$ réaction endoénergétique, possible dans le cas où $E_{\text{cin}}(A) + Q > 0$
- $Q = 0$ diffusion élastique (masse conservée).

- On utilisera dans la suite les masses atomiques et non les masses nucléaires, car tous les processus se passe dans la matière constituée d'atomes.



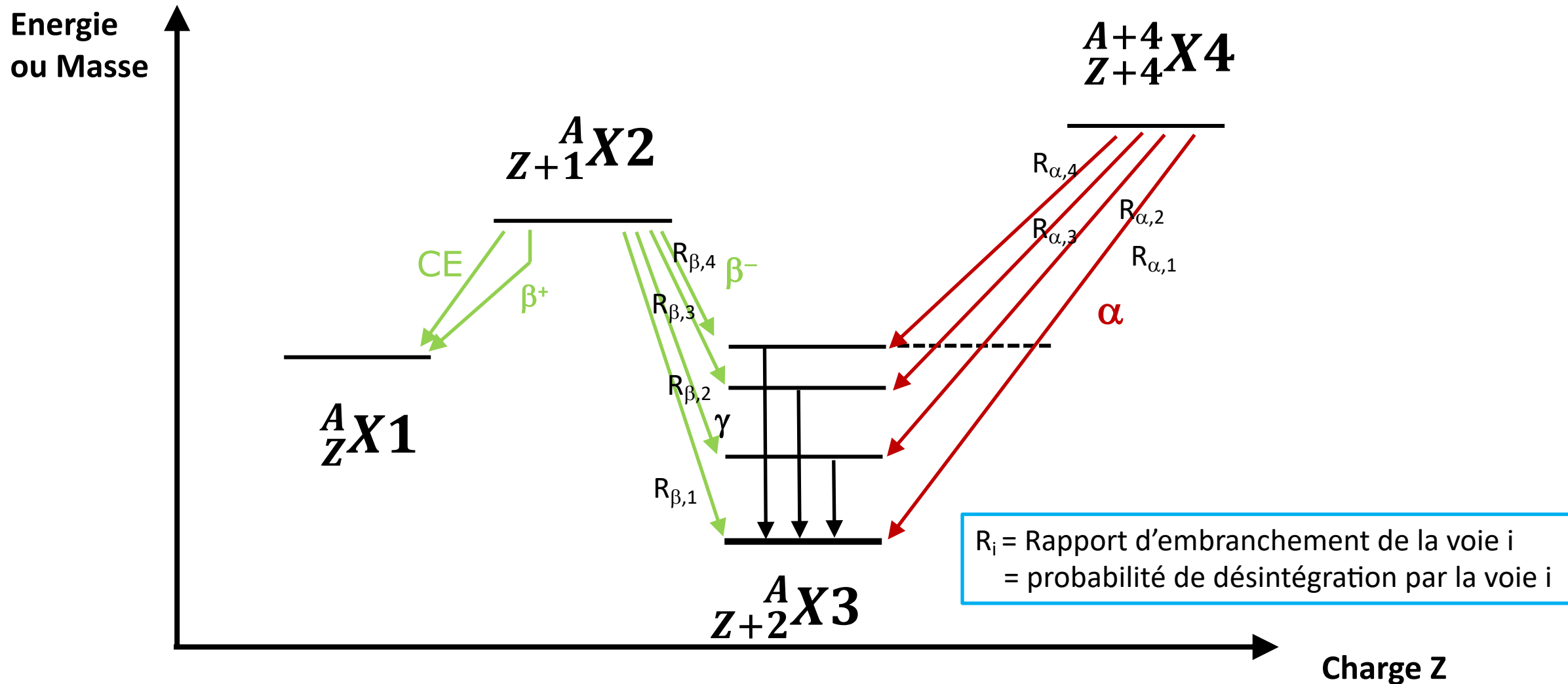
Lois de conservations

Les désintégrations radioactives et les réactions nucléaires vérifient les 4 lois de conservation suivantes :



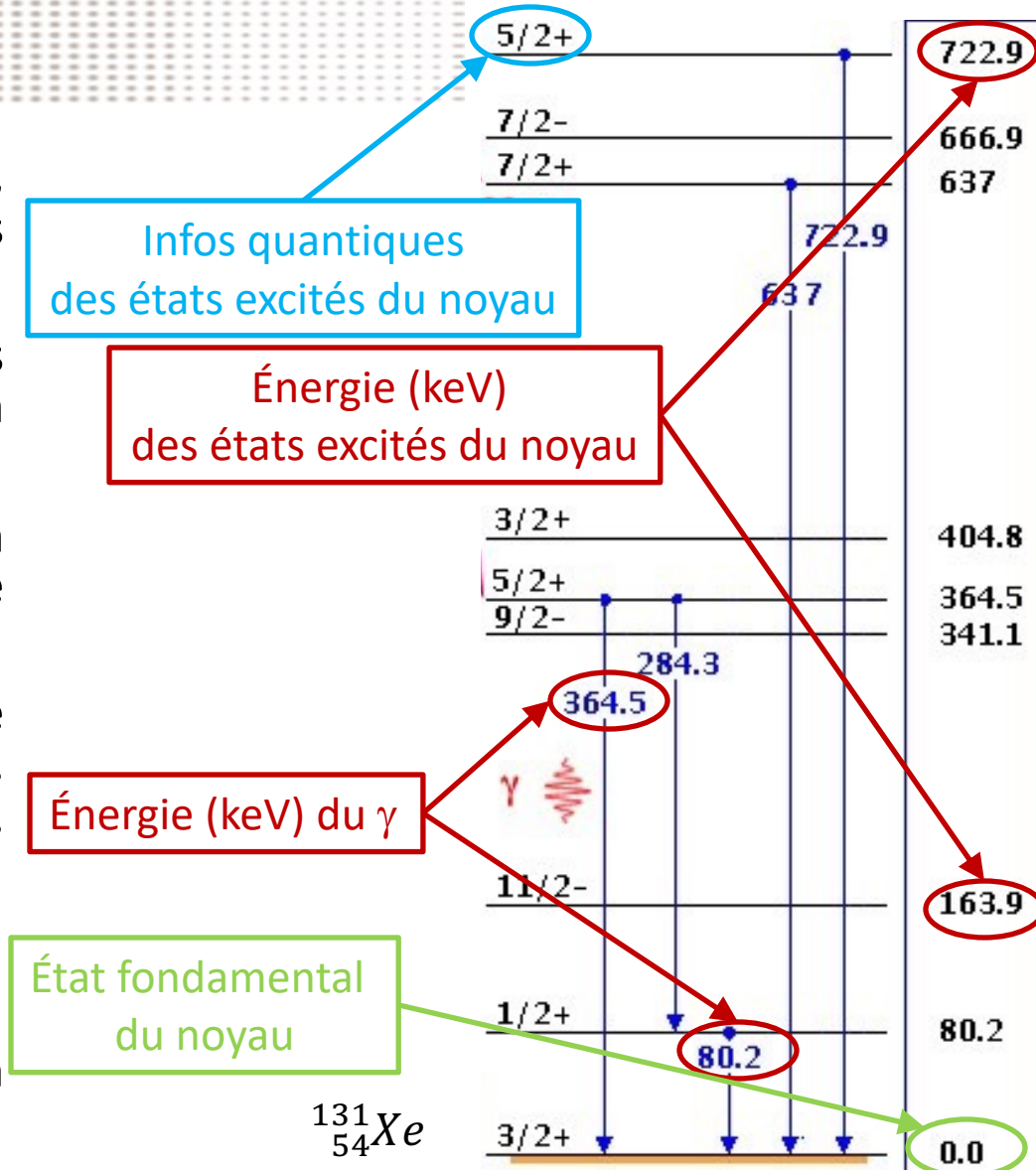
1. Conservation de l'énergie : $\sum E_i = \sum E_f$
2. Conservation de la quantité de mouvement : $\sum p_i = \sum p_f$
3. Conservation de la charge électrique : $\sum Z_i = \sum Z_f$
4. Conservation du nombre de nucléons : $\sum A_i = \sum A_f$

Schéma de désintégration

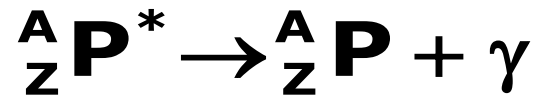
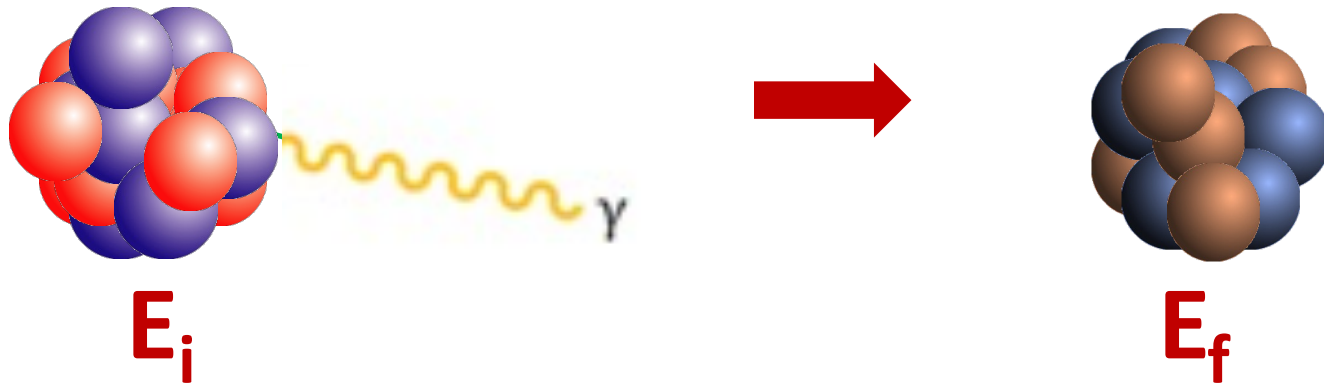


L'émission gamma

- ❑ Processus similaire à l'émission de photons X par l'atome excité, mais les énergies mises en jeu sont 10^4 à 10^6 fois plus élevées que dans le cas des émissions des atomes.
- ❑ Lorsqu'un noyau est excité, il peut sous certaines conditions retourner vers un état de plus faible énergie en émettant un photon γ .
- ❑ Le retour du noyau vers la stabilité peut se faire par l'émission soit d'un seul photon, soit par l'intermédiaire d'une cascade de photons.
- ❑ Les états final et initial du noyau émetteur possèdent le même A et même Z, seul l'état quantique change: E, spin et parité. L'appellation "isométrie nucléaire" est souvent employée. L'émission gamma est presque toujours immédiate.
- ❑ Pour certains noyaux elle se produit avec un certain retard : c'est un état métastable.
- ❑ L'émission γ est souvent en compétition avec la conversion interne.



Equation bilan et énergie disponible



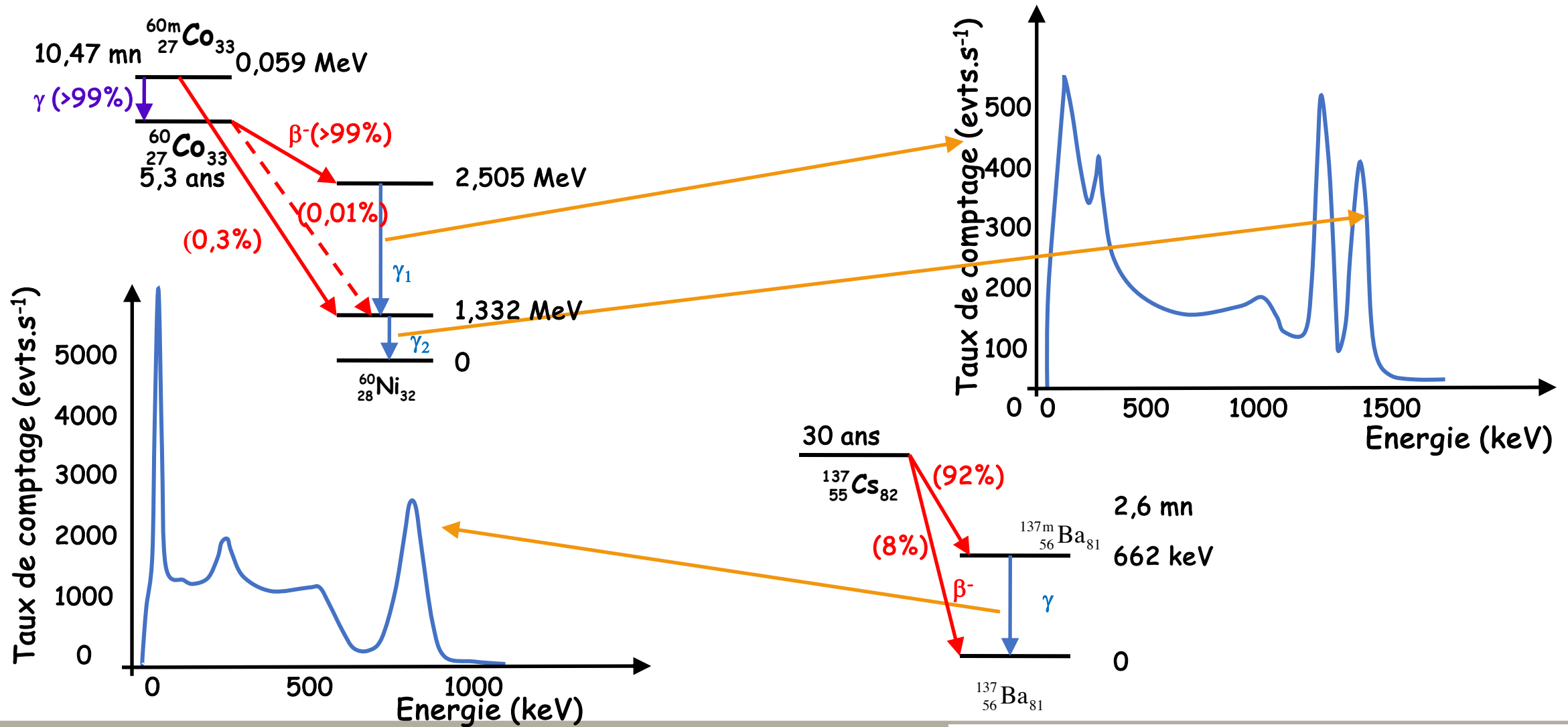
□ Comment s'en protéger ?

- Le γ pénètre davantage dans l'organisme que les autres rayonnements, mais il modifie moins les atomes qu'il rencontre.
- Un blindage très épais. Par exemple, pour réduire de seulement 30 % ce rayonnement, il faut être derrière 6 cm de plomb, 30 cm de béton ou 54 cm de terre.

$$E_\gamma = h\nu = E_i - E_f$$

**Energie discontinue
caractéristique du radionucléide**

Mesure : Exemple du ^{60}Co et du ^{137}Cs



Conversion interne

□ Un noyau dans un état excité E_i , se désexcite vers un état d'énergie plus faible E_f , en transmettant directement son surplus d'énergie $E_i - E_f$ à un électron de son cortège électronique.

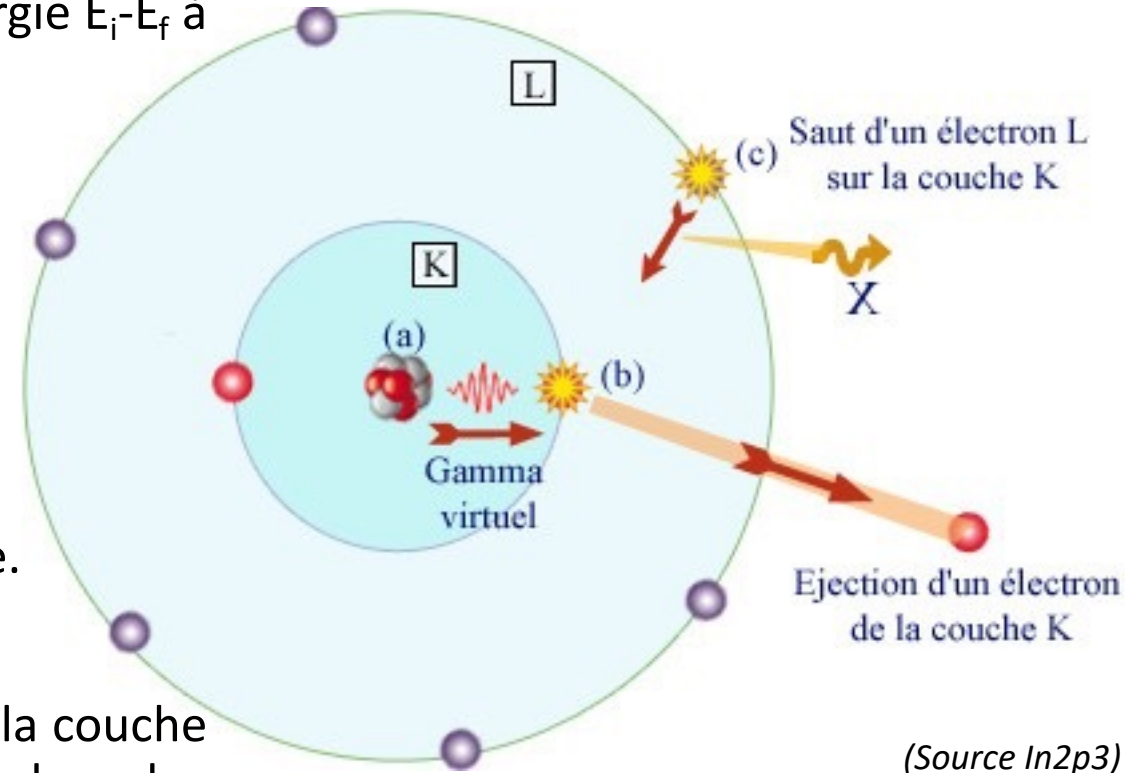
□ L'électron est alors éjecté de sa couche électronique avec E_c :

$$E_c = E_i - E_f - E_l$$

□ E_l est l'énergie de liaison de l'électron sur sa couche atomique.

□ La probabilité d'éjecter un électron est plus importante avec la couche la plus interne (couche K) et diminue rapidement avec les couches plus externes.

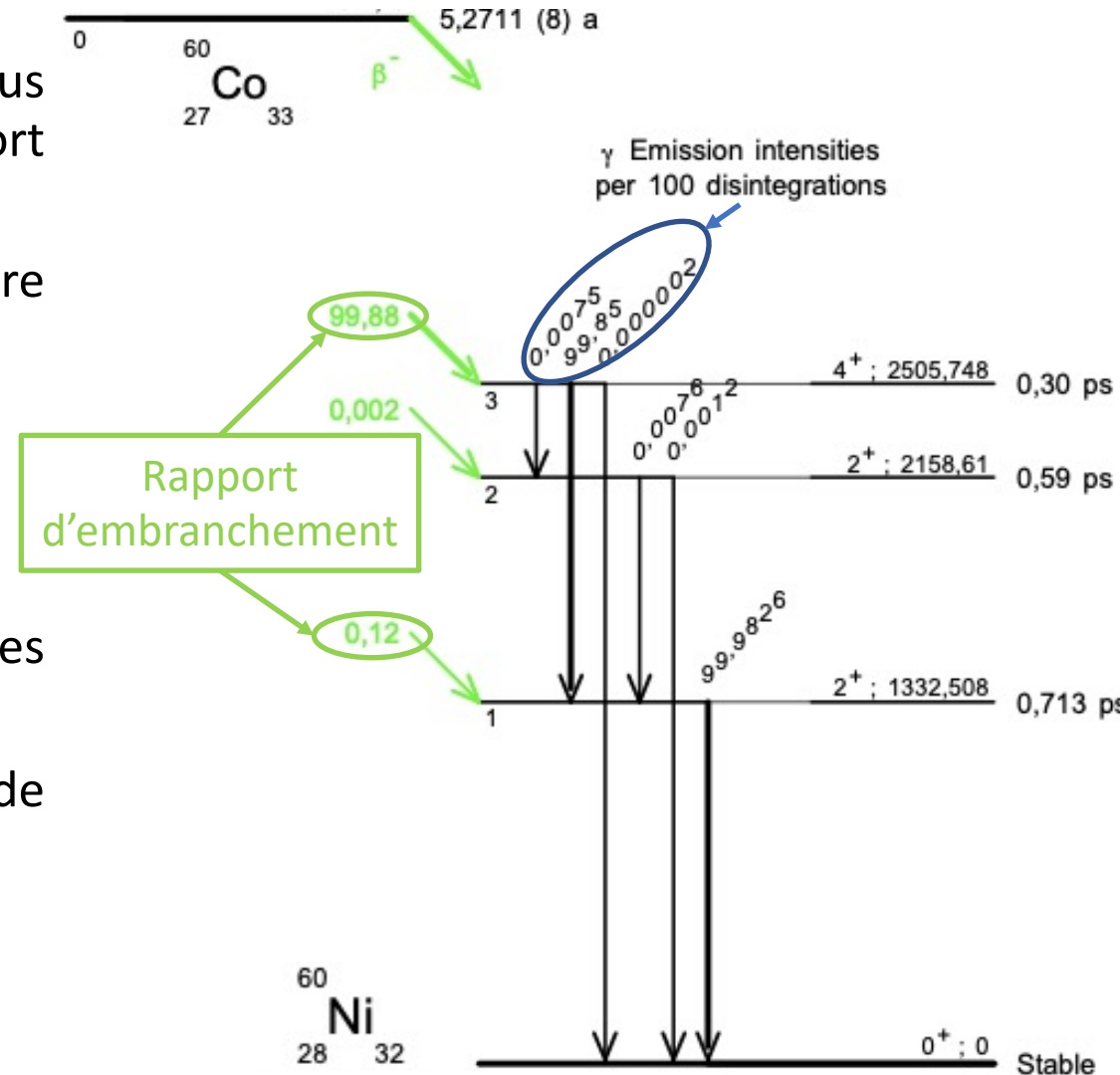
□ Après une conversion interne, le cortège atomique ayant une place vacante doit se réarranger en émettant un rayonnement X.



(Source In2p3)

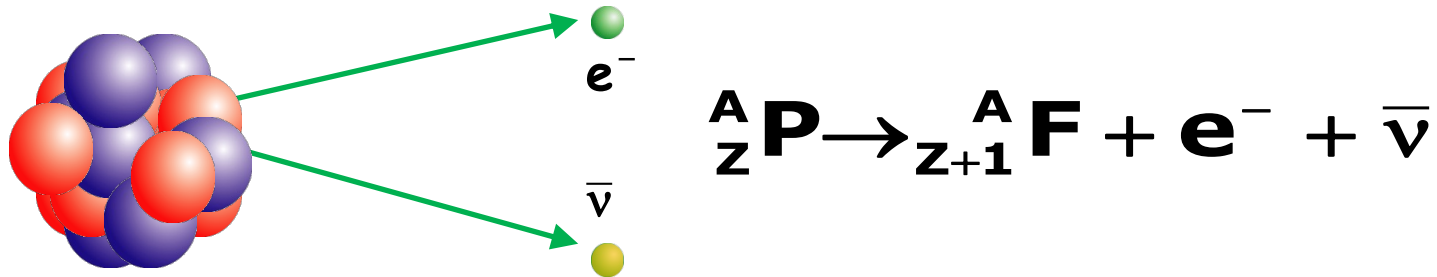
L'émission bêta

- ❑ L'émission bêta est la désintégration radioactive la plus commune, car dès qu'un noyau ne possède pas un rapport neutron-proton optimal il subira une désintégration β .
- ❑ L'émission bêta se caractérise par la modification de la nature d'un nucléon:
 - transformation d'un neutron en proton: désintégration β^-
 - transformation d'un proton en neutron: désintégration β^+
- ❑ C'est une transformation isobarique: $A = \text{cste}$.
- ❑ Les temps de vie moyen τ des émetteurs β varient de quelques ms à $\sim 10^{16}$ ans.
- ❑ En compétition avec l'émission β^+ , existe le phénomène de capture électronique.
- ❑ Tous les produits de fission sont émetteurs β .



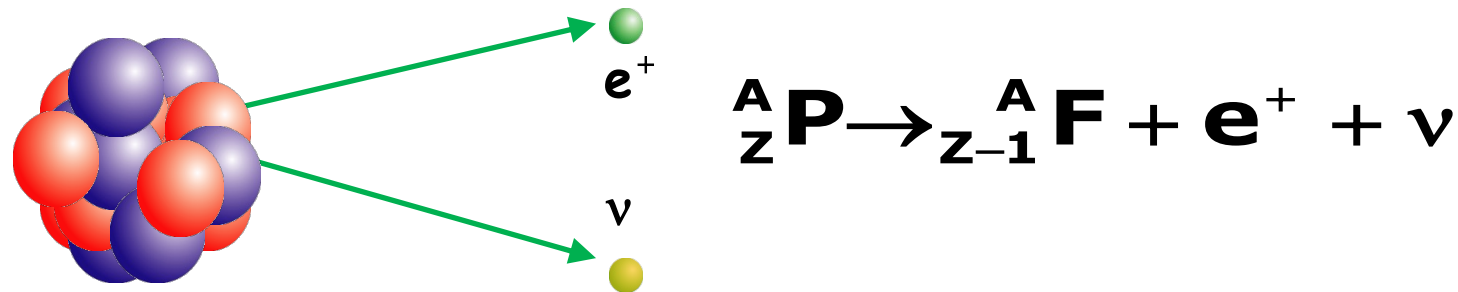
Equation bilan et énergie disponible

- Désintégration β^- : excès de neutrons : 1 n se transforme en 1 p



$$Q_{\beta^-} = [M_{\text{ato}}(A, Z) - M_{\text{ato}}(A, Z+1)]c^2$$

- Désintégration β^+ : excès de protons : 1 p se transforme en 1 n

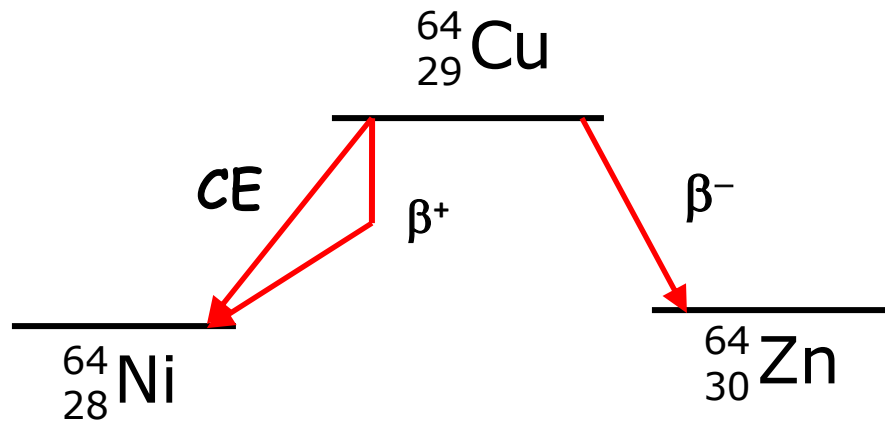


$$Q_{\beta^+} = [M_{\text{ato}}(A, Z) - M_{\text{ato}}(A, Z-1) - 2m_e]c^2$$

- Comment s'en protéger ?

- L'émission β cause plus de dégâts que l'émission α car l'électron émis est chargé électriquement.
- Une simple feuille d'aluminium de quelques millimètres suffit. On peut également utiliser une feuille de verre ou un écran d'un cm de plexiglas.

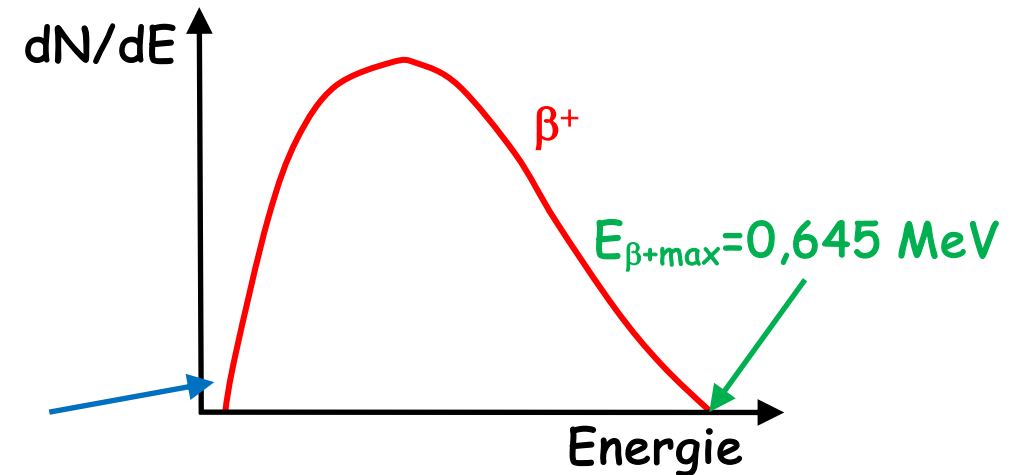
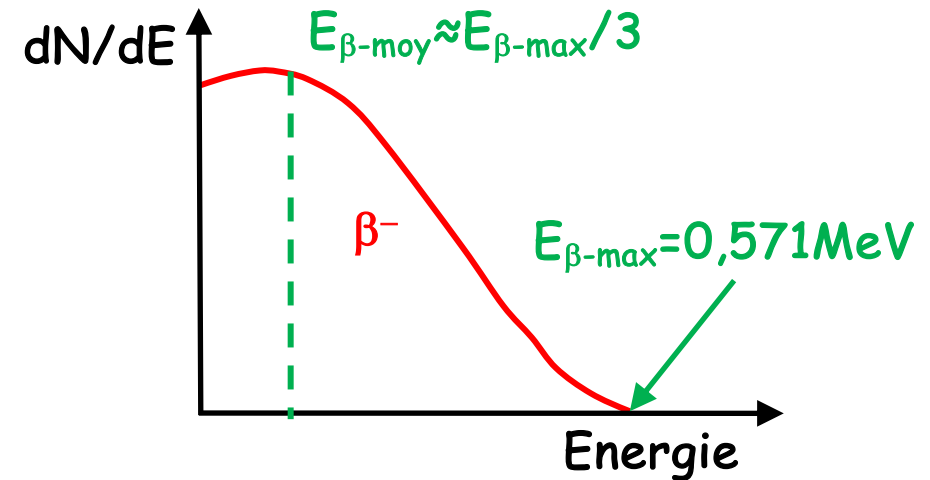
Mesure: exemple du cuivre



$$E_{\beta^+ \text{ max}} = 0,645 \text{ MeV}$$

$$E_{\beta^- \text{ max}} = 0,571 \text{ MeV}$$

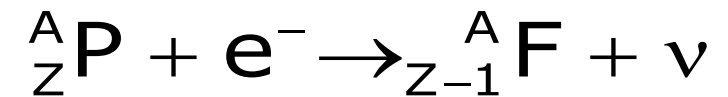
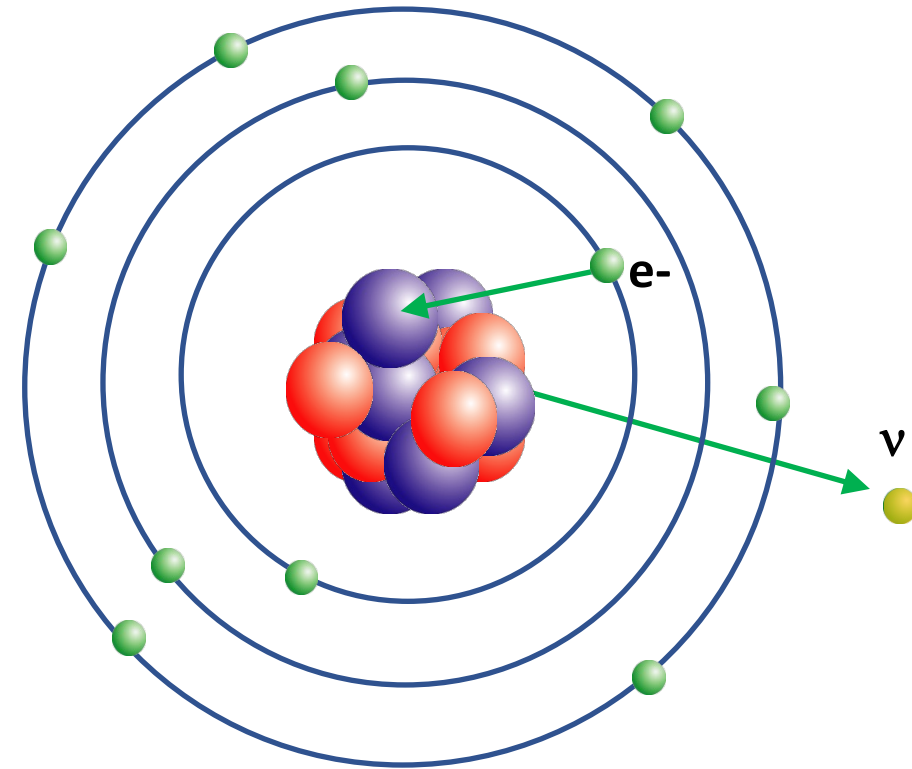
Effet coulombien



La capture électronique

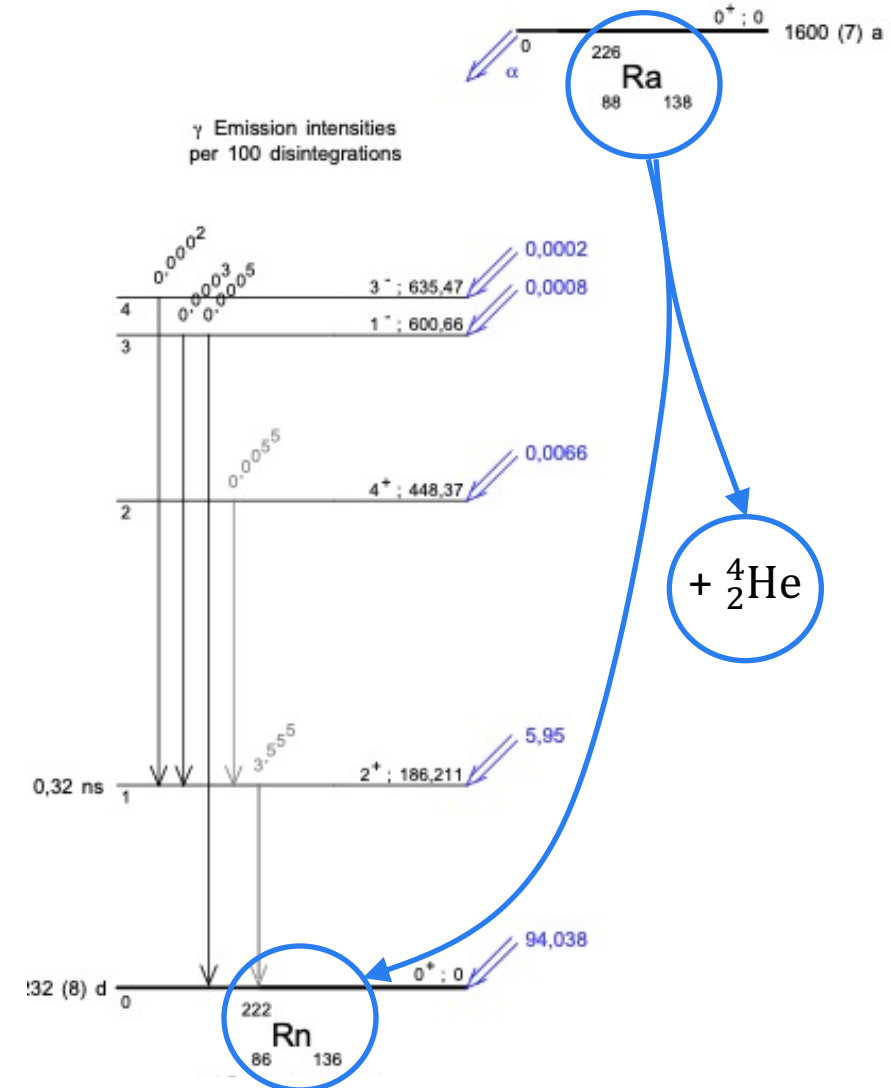
- ❑ La capture électronique est la capture par un proton du noyau d'un électron du cortège électronique.
- ❑ Ce processus est en compétition avec l'émission β^+ et qui, comme elle relève de l'interaction faible.
- ❑ Les électrons atomiques ont une certaine probabilité de présence non nulle à l'intérieur du noyau (notamment les électrons K).
- ❑ Un électron atomique peut donc être capté par le noyau, un proton se convertit en neutron et un neutrino est émis.
- ❑ Une vacance est créée dans le cortège électronique et donc s'ensuivra les deux processus de désexcitation de l'atome : émissions de photons X et d'électrons Auger.
- ❑ Energie disponible :

$$Q_{CE} = [M_{\text{ato}}(A, Z) - M_{\text{ato}}(A, Z-1)]c^2 - E_I$$

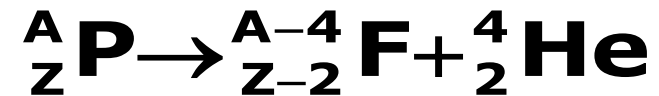
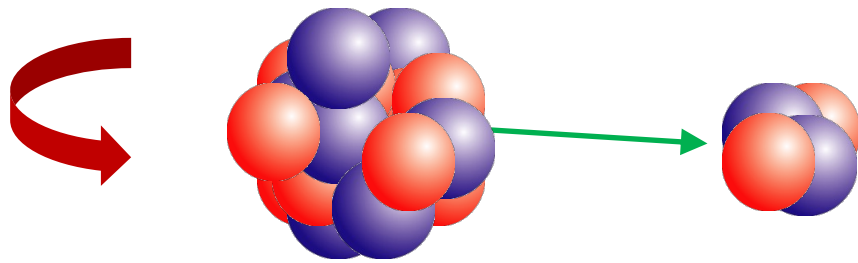


Désintégration alpha

- ❑ Ce type de radioactivité est le premier qui fut découvert (1896 par Becquerel, Rutherford, Curie).
- ❑ C'est un mode de désintégration par partition.
- ❑ Environ 160 nucléides connus sont radioactifs α ; à part quelques exceptions, ils appartiennent tous aux noyaux lourds avec $Z > 82$ (Pb) et $A > 200$.
- ❑ Ils émettent des particules α , qui sont des noyaux d'hélium: c'est un noyau particulièrement stable du fait de sa structure doublement magique en protons et neutrons (2 protons et 2 neutrons, $A=4$).
- ❑ L'énergie et la quantité de mouvement totale conservées lors de la désintégration se répartissent sur le noyau fils et le noyau d'hélium.



Equation bilan et énergie disponible

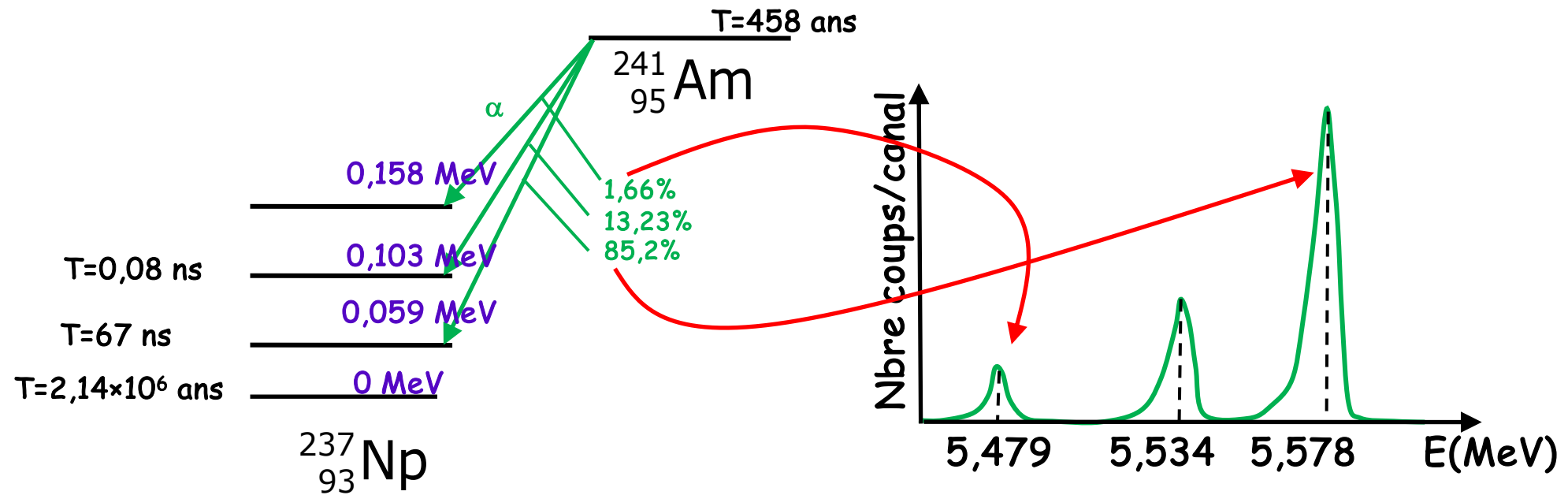


Comment s'en protéger ?

Les noyaux d'hélium sont arrêtés facilement par les atomes de la matière. Ils sont arrêtés par une feuille de papier.

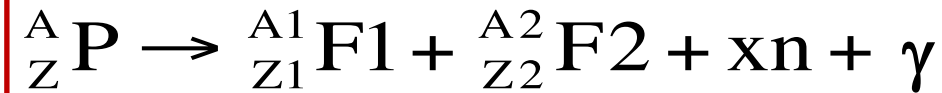
$$Q_\alpha = [M_{\text{ato}}(A, Z) - M_{\text{ato}}(A-4, Z-2) - M_{\text{ato}}(\alpha)]c^2$$

Mesure : Exemple de l'Am-241



La fission

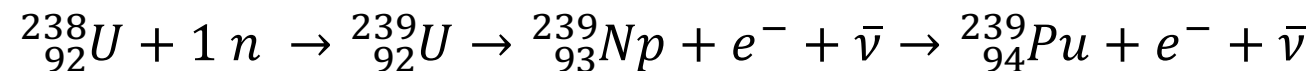
- La fission nucléaire est la coupure d'un noyau lourd en deux noyaux plus petits.
- La réaction est accompagnée d'une émission de neutrons, de gammas et d'un fort dégagement de chaleur.
- Ce dégagement de chaleur est utilisé pour produire l'électricité.
- La réaction s'écrit:



- La fission sera souvent en compétition avec la désintégration α , car elle affecte aussi les noyaux lourds.
- On fera la distinction entre:
 - **fission spontanée**, où le noyau fissionne sans absorption préalable d'une particule, c'est-à-dire sans apport d'énergie.
 - **fission provoquée**, dans laquelle le noyau absorbe une particule (généralement un neutron) et donc une certaine quantité d'énergie qui provoque la fission du noyau ainsi formé.
- La fission spontanée est un processus peu probable, à période longue (c'est pour cela qu'elle est observée encore sur des noyaux existants comme l'uranium ou le thorium; il se produit environ une fission spontanée par heure dans un gramme d'uranium 235).
- La fission provoquée est le processus utilisé dans les réacteurs nucléaires.
- On ne connaît actuellement que 19 noyaux qui fissionnent spontanément: uranium-238, thorium-232,...

Noyaux fissiles et fertiles

- ❑ Les noyaux atomiques pouvant fissionner sont dits « **fissiles** »: c'est le cas de l'uranium-235 ou du plutonium-239.
- ❑ Les noyaux atomiques qui conduisent à la formation d'un noyau fissile par capture d'un neutron sont dits « **fertiles** ». On n'en trouve que deux dans la nature, le thorium 232 et l'uranium 238.
- ❑ Les noyaux fertiles jouent un rôle très important dans les réacteurs, comme nous le verrons dans la partie sur le cycle de combustible.

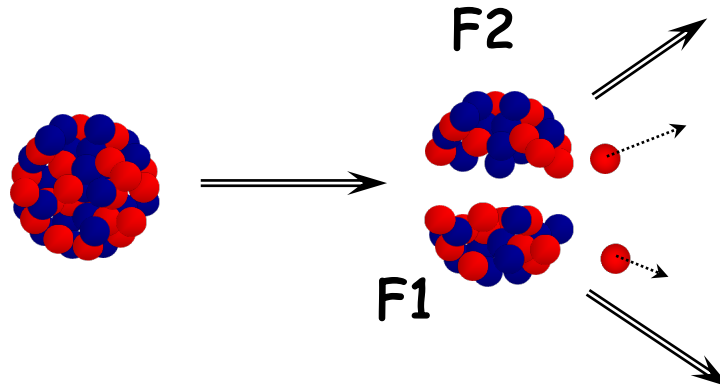


Noyau fertile

Noyau fissile

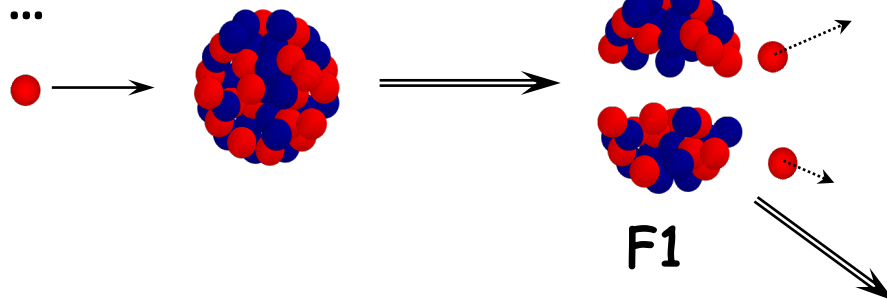
Fission spontanée et provoquée

Fission spontanée



Neutron
Gamma
Noyau
...

Fission provoquée



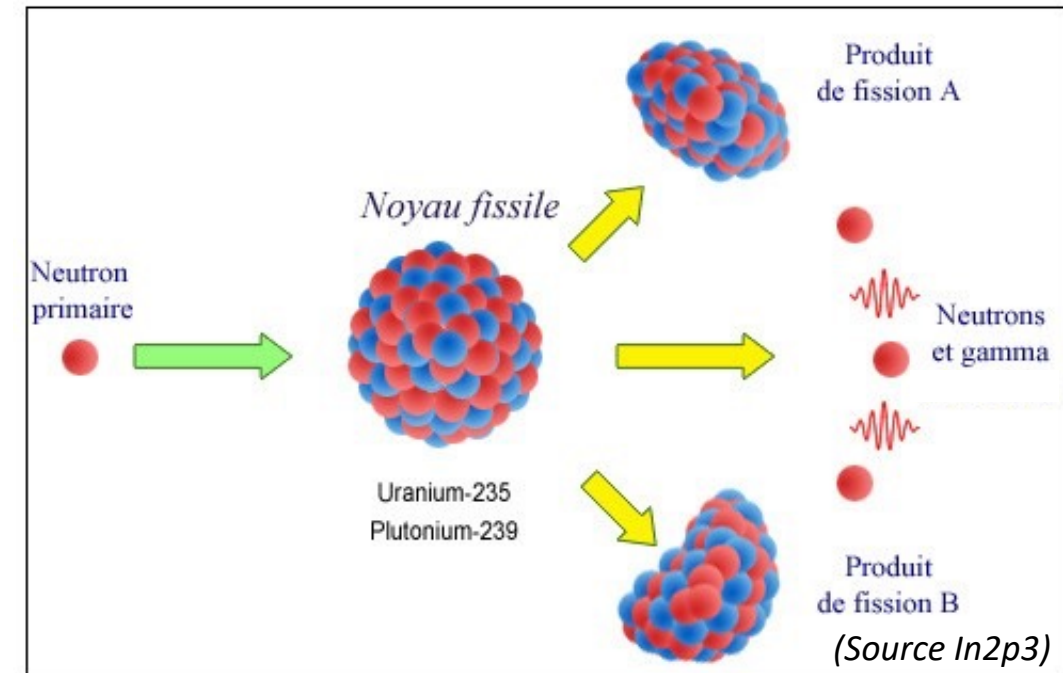
Nombre moyen de neutrons émis lors d'une fission de $^{235}\text{U} = 2,4$

- C'est le processus utilisé dans les réacteurs nucléaires.
- En France on utilise l'uranium-235 et des neutrons dits thermiques (énergie de l'ordre de 0,025 eV).
- Mais d'autres réactions de fission peuvent être utilisées suivant les types de filière.

L'énergie disponible dans la fission

□ La fission provoquée par neutrons est exothermique et l'énergie de fission se divise comme suit :

- Energie cinétique des fragments de fission $\sim 170 \text{ MeV}$
(Désexcitation des fragments de fission)
- Energie de désexcitation β $\sim 5 \text{ MeV}$
- Energie de désexcitation γ $\sim 5 \text{ MeV}$
- Energie cinétique des neutrinos $\sim 11 \text{ MeV}$
- Energie des γ prompts $\sim 6 \text{ MeV}$
- Energie cinétique des neutrons prompts $\sim 6 \text{ MeV}$
- Energie Totale de Fission $\approx 200 \text{ MeV}$



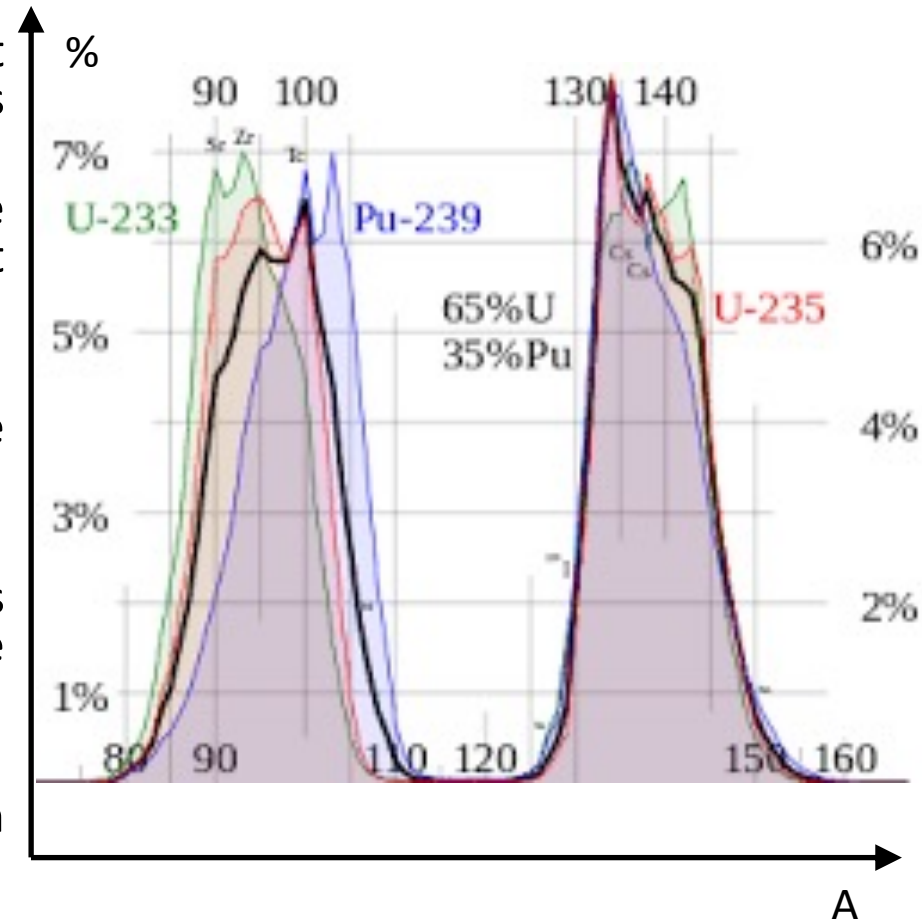
□ Seule l'énergie des neutrinos sera perdue pour le bilan énergétique.

□ L'énergie cinétique des fragments de fission sera immédiatement transformée en chaleur; l'énergie cinétique des neutrons et des γ prompts sera très rapidement également transformée en chaleur.

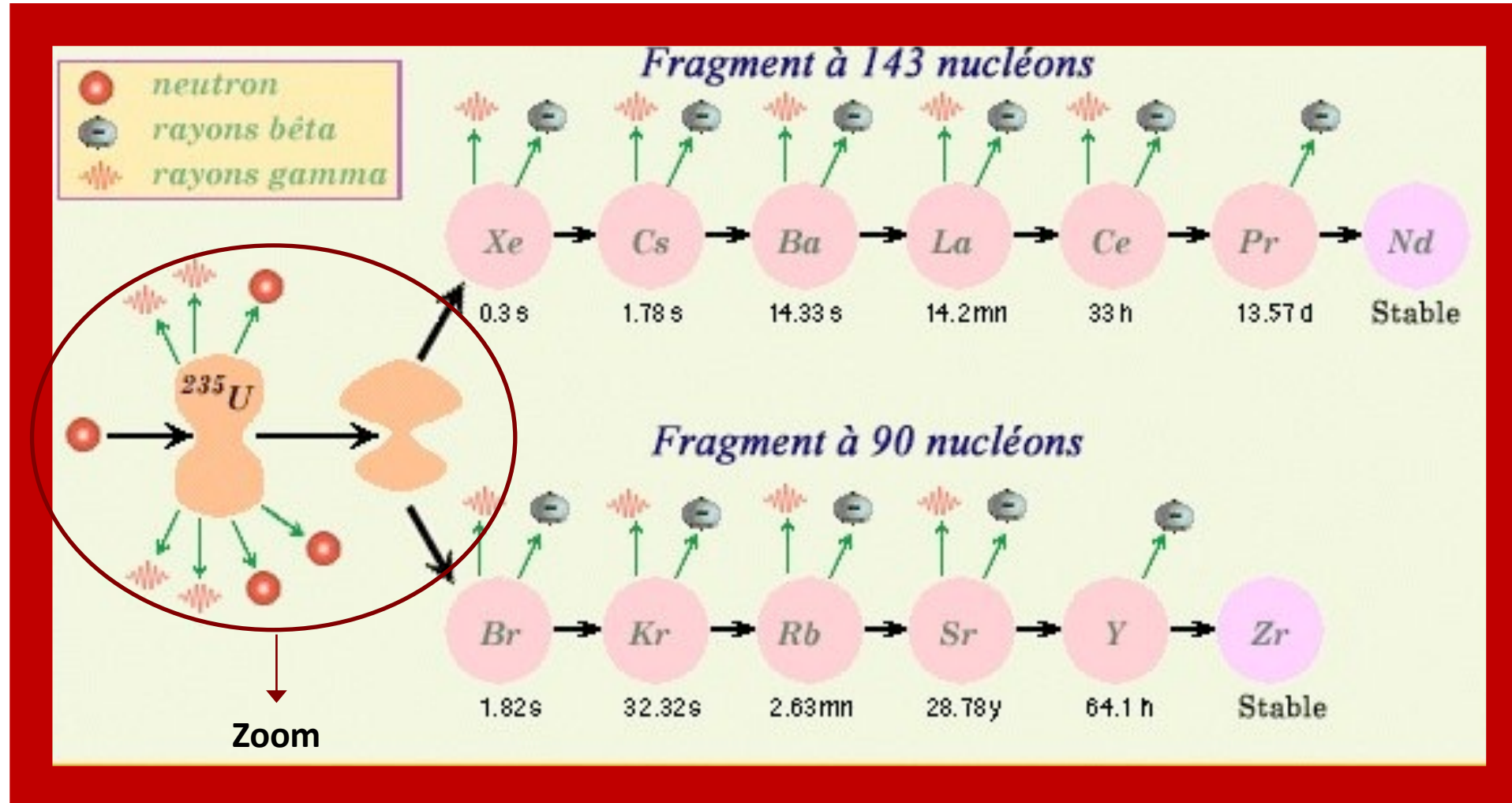
□ Seule l'énergie de désexcitation des fragments de fission (β et γ) sera relâchée progressivement suivant leur période de désexcitation (quelques heures).

Les fragments de fission

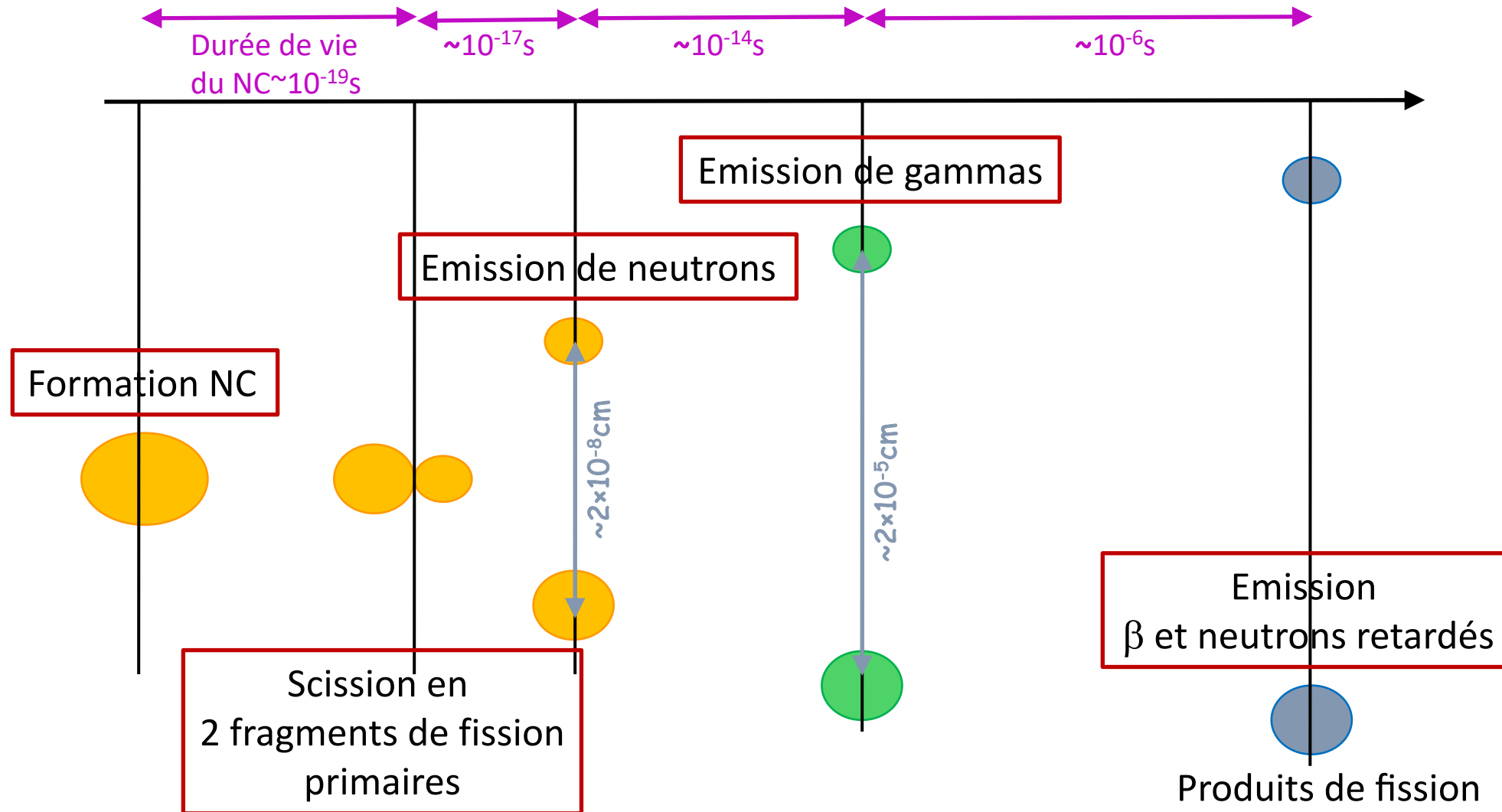
- ❑ Les fragments de fission produits sont riches en neutrons. Ils seront donc émetteurs β^- .
- ❑ La distribution en masse des fragments F1 et F2 est généralement asymétrique, mais elle peut être également symétrique (fréquent à très haute énergie).
- ❑ En général, les deux fragments ont des énergies cinétiques différentes: le fragment léger a un long parcours et le fragment lourd a un court parcours.
- ❑ À chaque fragment de fission correspond une chaîne de produits de fission, tous radioactifs sauf le dernier nucléide qui sera stable.
- ❑ En général, on appelle produits de fission toute la chaîne des descendants, et le fragment final. En revanche l'appellation fragment de fission est réservé aux fragments initiaux.
- ❑ Lorsque l'on parle de déchets nucléaires, ce sont ces produits de fission qui sont désignés.



Exemple : la fission de l'U-235 par neutrons



Chronologie d'une fission provoquée



Comparaison des grandeurs

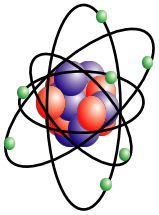
- Lorsque l'on choisit un combustible nucléaire, il faut prendre en compte en particulier:
- L'énergie émise lors d'une fission,
 - L'énergie moyenne des neutrons émis,
 - Le nombre de neutrons émis lors d'une fission...

	U-233 (n_{th}/n_{rap})	U-235	U-238	Pu-239 (n_{th}/n_{rap})
Q_{dispo} (MeV)	190	193	194	198,5
$E_{moy}(n)$ (MeV)	1,93/2,03	1,98	1,98	2,07/2,18
Nombre moyen de n émis ($\bar{\nu}$)	2,402/2,677	2,376	2,546	2,813/3,112

(source M.F. JAMES – Energy released in fission, Journal of Nuclear Energy, vol. 23, pp. 517- 536, Pergamon Press (1969))

Intérêt de la fission

- ❑ La fission permet la production d'énergie électrique de manière industrielle.
- ❑ Dans certaines conditions, la fission peut induire une réaction en chaîne dans un milieu fissile permettant d'extraire de la matière une énergie énorme :



100 g d'uranium



600 kg de GNL



1 t de pétrole

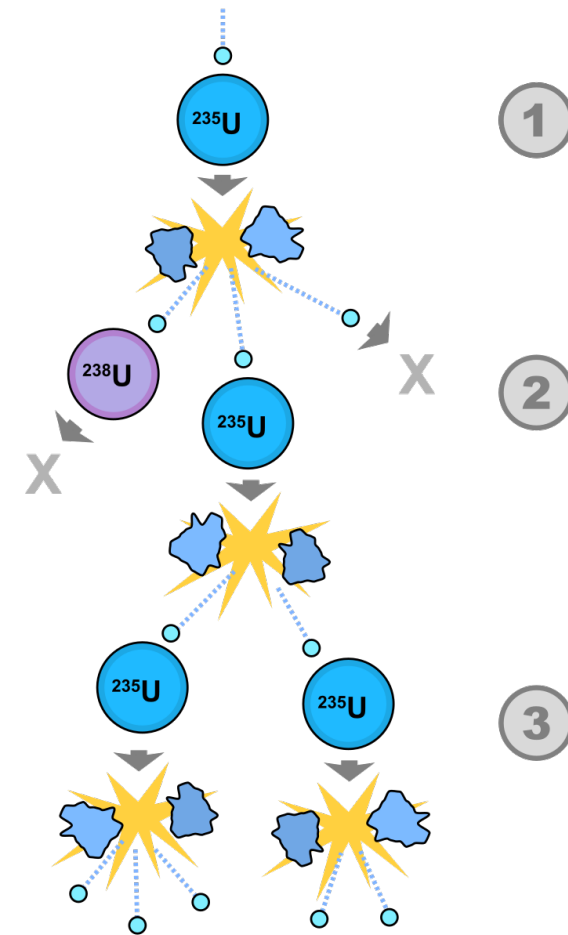


1,5 t de charbon



2,5 t de bois

- ❑ Cette réaction en chaîne peut être :
 - soit contrôlée: ce principe est utilisé dans les réacteurs nucléaires, pour produire de l'électricité,
 - soit divergente: cela est utilisé dans les bombes atomiques, pour produire une explosion.
- ❑ Comme toute industrie, la production électronucléaire produit des déchets : les déchets radioactifs.



(Source Wikipédia)

Merci de votre attention.

