



UE 3A

Organisation des appareils et des systèmes : Aspects fonctionnels et méthodes d'étude

Dr Tristan Richard

Rayons X et gamma – Rayonnements particuliers

Natures et propriétés des REM

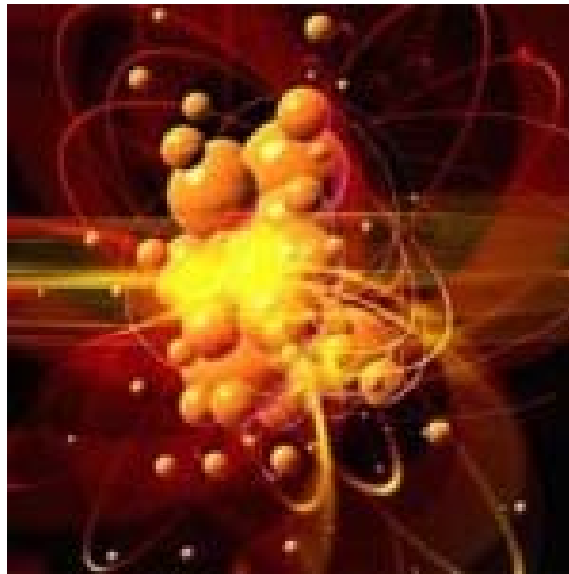
Principales caractéristiques des rayonnements α et β

Interaction avec la matière: effet photo-électrique, diffusions, matérialisation

Détection

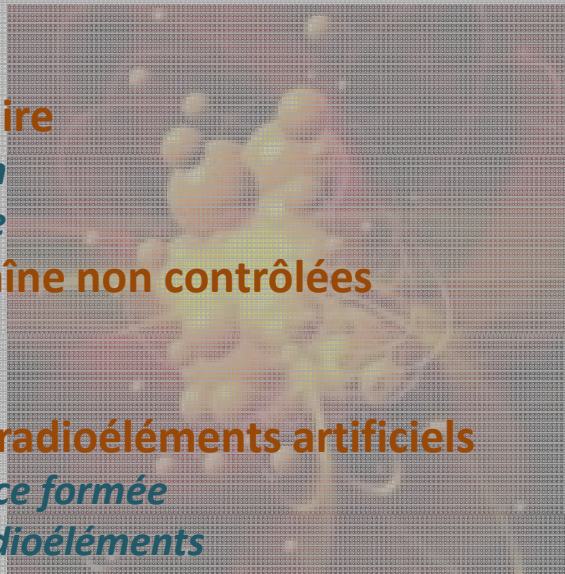
- Physique Nucléaires : Généralités
- La Radioactivité
- Interactions Rayonnements – Matière
- Les Réactions Nucléaires
- Les Rayons EM
- Les Détecteurs

Les Réactions Nucléaires



Les Réactions Nucléaires

- 1. Généralités**
 - 1.1 *La radioactivité artificielle*
 - 1.2 *Les principales réactions*
- 2. Accélérateurs de particules**
 - 2.1 *Accélérateur de Van de Graaff*
 - 2.2 *Accélérateur linéaire (LINAC)*
 - 2.3 *Cyclotron*
 - 2.4 *Syncho-cyclotron*
 - 2.5 *Synchrotron*
 - 2.6 *Bêtatron*
- 3. La Fission nucléaire**
 - 3.1 *Réaction de fission*
 - 3.2 *Réacteur nucléaire*
- 4. Réactions en chaîne non contrôlées**
 - 4.1 *Fission*
 - 4.2 *Fusion*
- 5. Préparation des radioéléments artificiels**
 - 5.1 *Activité de la source formée*
 - 5.2 *Séparation des radioéléments*
 - 5.3 *Utilisations des radioéléments*
- 6. Datation**
 - 6.1 *Datation ^{14}C*
 - 6.2 *Autres méthodes de datation par radioactivité*



1. Généralités

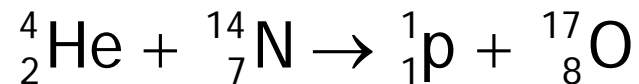
1.1 La radioactivité artificielle

● bombardement de noyaux par des particules

✱ formation de radioéléments artificiels → transmutation nucléaire

● historique

✱ **1919** expérience de **Rutherford** → mise en évidence réaction nucléaire



✱ **1932** **J. Chadwick** → découverte du neutron

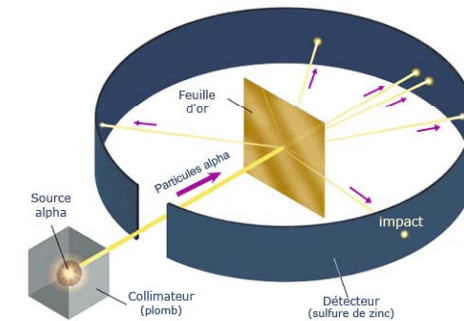
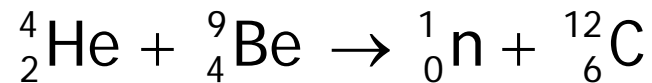
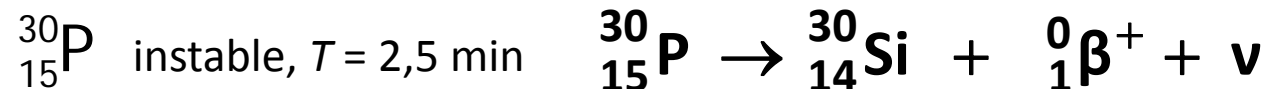


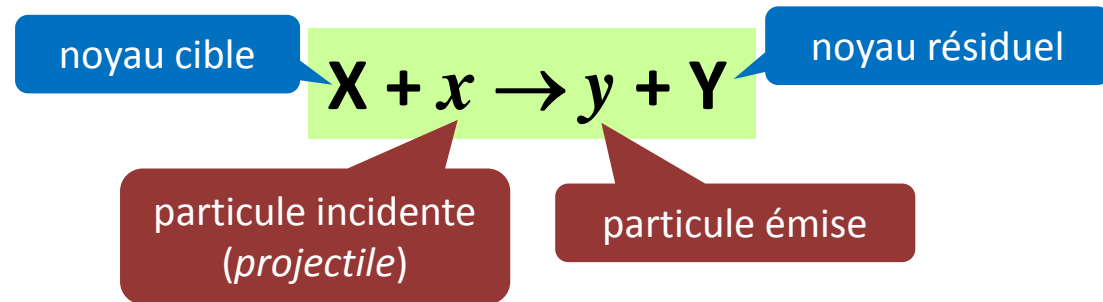
schéma de l'expérience de Rutherford

✱ **1934** **F. et I. Joliot-Curie** → premier radioélément artificiel



F. et I. Joliot-Curie

● réaction nucléaire



✱ notation

réaction (x,y) ou $X(x,y)Y$

● **section efficace**: probabilité d'interaction d'une particule pour une réaction

✱ surface utile du choc présentée par le noyau cible au projectile incident

$$\sigma = \frac{\text{nombre de réactions par noyau cible par unité de temps}}{\text{nombre de photons incidents par m}^2 \text{ (flux incident)}}$$

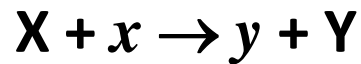
✱ unité usuelle: le **barn (b)** **1 barn = 10^{-28} m^2**

● **projectiles**: particules lourdes

✱ nucléons (protons et neutrons), particules α ou noyaux

✱ Particules chargées : doivent être accélérées (pour pouvoir vaincre la répulsion électrostatique du noyau)

● énergie libérée par la réaction (Q)



conservation de l'énergie $(M_X + M_x)c^2 + Ec^x = (M_Y + M_y)c^2 + Ec^Y + Ec^y$

$$Ec^Y + Ec^y - Ec^x = (M_X + M_x)c^2 - (M_Y + M_y)c^2$$

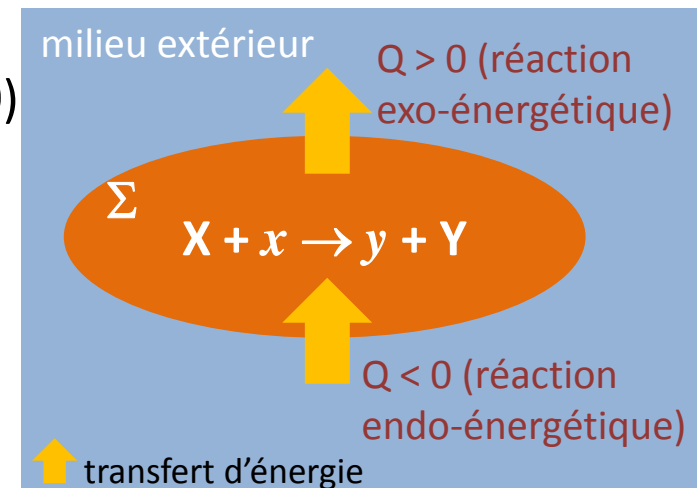
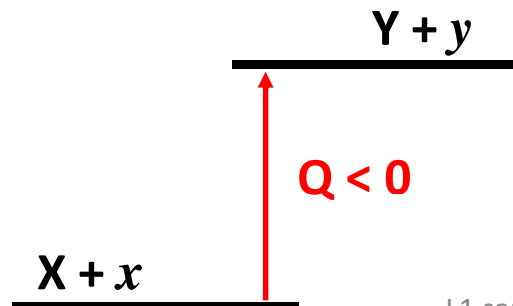
$$Q = Ec^Y + Ec^y - Ec^x = (M_X + M_x)c^2 - (M_Y + M_y)c^2$$

● $Q > 0$:

- réaction toujours possible (même si $Ec^x = 0$)
- réaction exo-énergétique

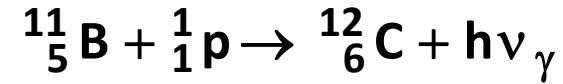
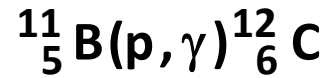
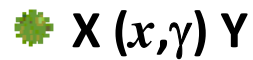
● $Q < 0$:

- réaction possible si $Ec^x > Q$
- réaction endo-énergétique

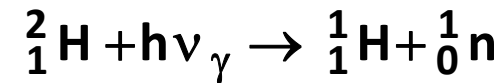
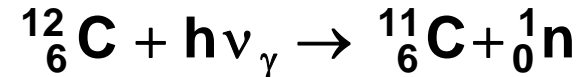
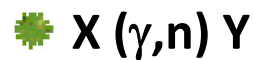


1.2 Principales réactions

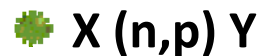
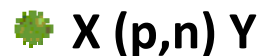
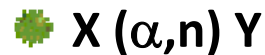
● capture radiative



● réaction photonucléaire



● réaction de transmutation (transfert)



Béryllium



Bore

● fusion



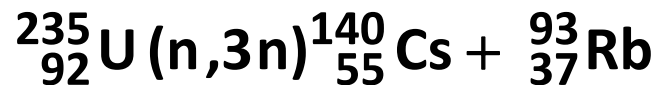
noyaux de tailles voisines

● fission

k neutrons



fragments de fission



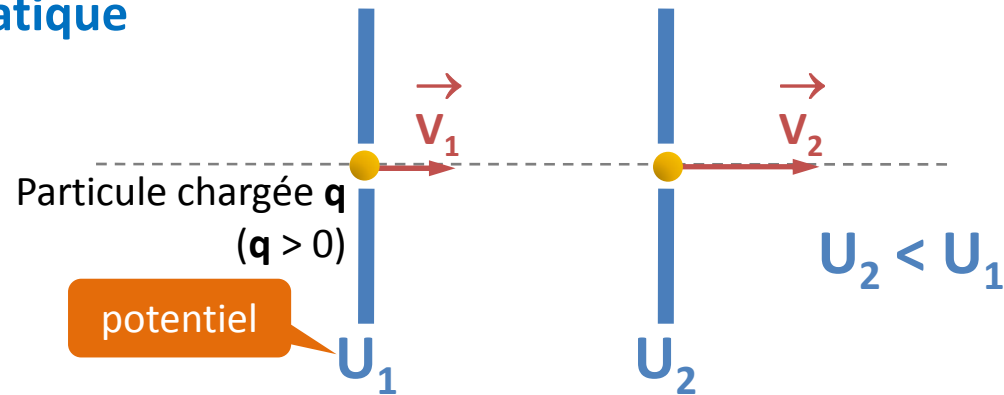
Césium

Rubidium

2. Accélérateurs de particules

- **particules chargées (α , p, noyaux)**: accélération des particules incidentes pour interagir avec les noyaux cibles

- **accélération électrostatique**



conservation de l'énergie

$$\frac{1}{2}mV_1^2 + qU_1 = \frac{1}{2}mV_2^2 + qU_2$$

énergie électrostatique

variation énergie cinétique

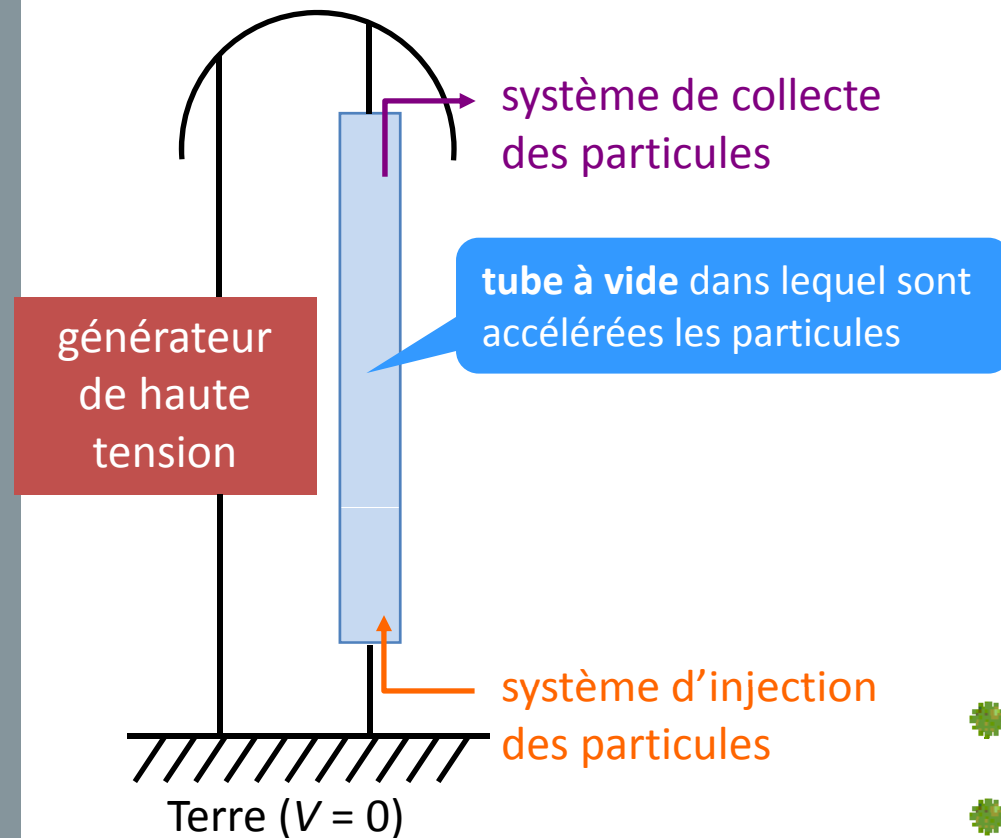
$$\Delta E_c = E_{c2} - E_{c1} = q(U_1 - U_2) = q\Delta U$$

différence de potentiel

2.1 Accélérateur de Van de Graaff

- accélération en une fois par une grande différence de potentiel

- ✱ concept proposé par R. Van de Graaff (~ 1930)



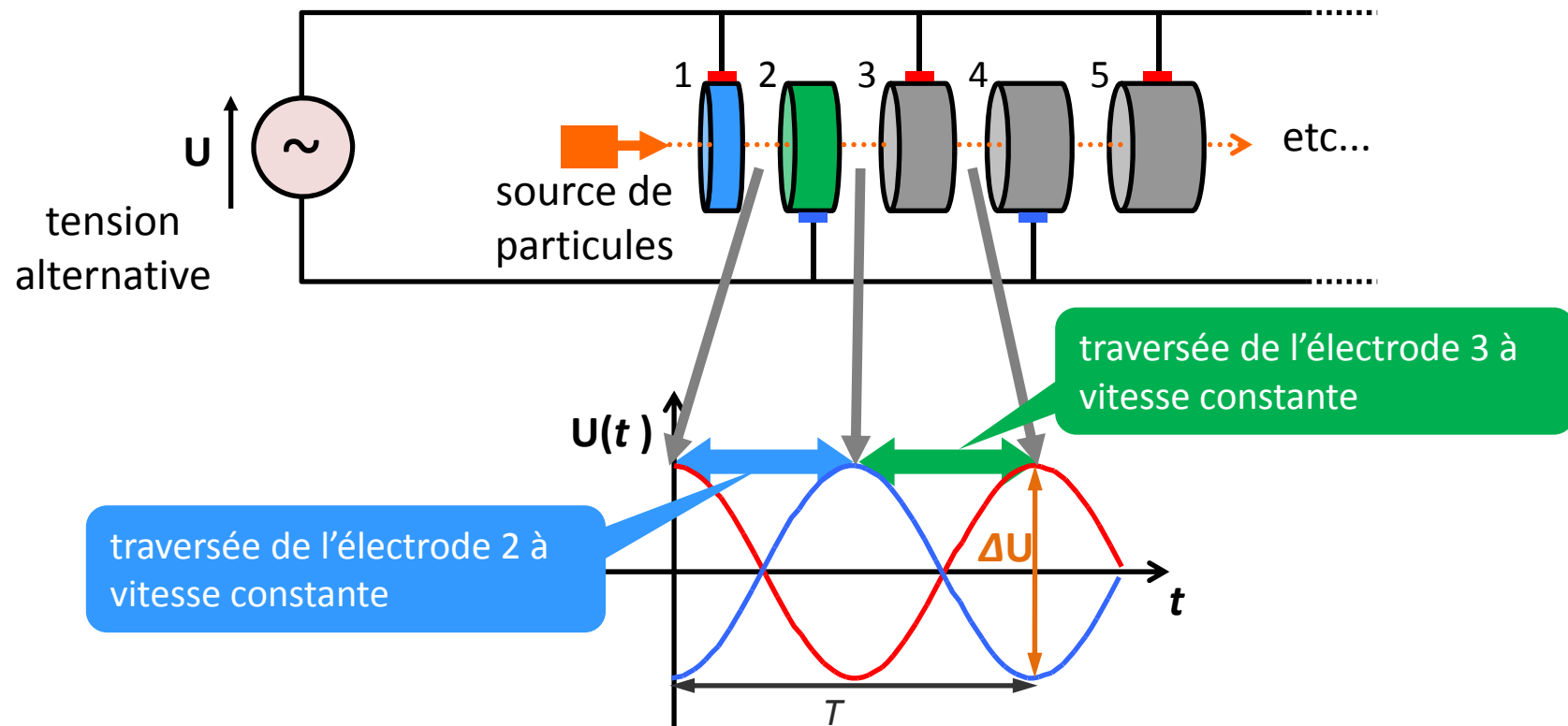
accélérateur de Van Graaff (©CNRS/IN2P3 (2003))

- ✱ différence de potentiel $\Delta U = 6 \cdot 10^6 \text{ V}$

- ✱ énergie cinétique 6 MeV

2.2 Accélérateur linéaire (LINAC)

- plusieurs accélérations consécutives par de faibles différences de potentiel



✱ différence de potentiel $\Delta U \approx \text{kV}$

✱ fréquence $f \approx \text{MHz}$

- énergie acquise à l'entrée de la $n^{\text{ième}}$ électrode

$$\Delta E_n = (n - 1) q \Delta U$$

- longueur de la $n^{\text{ième}}$ électrode $L_n = v_n \frac{T}{2}$

vitesse de la particule à
l'entrée de la $n^{\text{ième}}$ électrode

- Énergie totale acquise : MeV – GeV



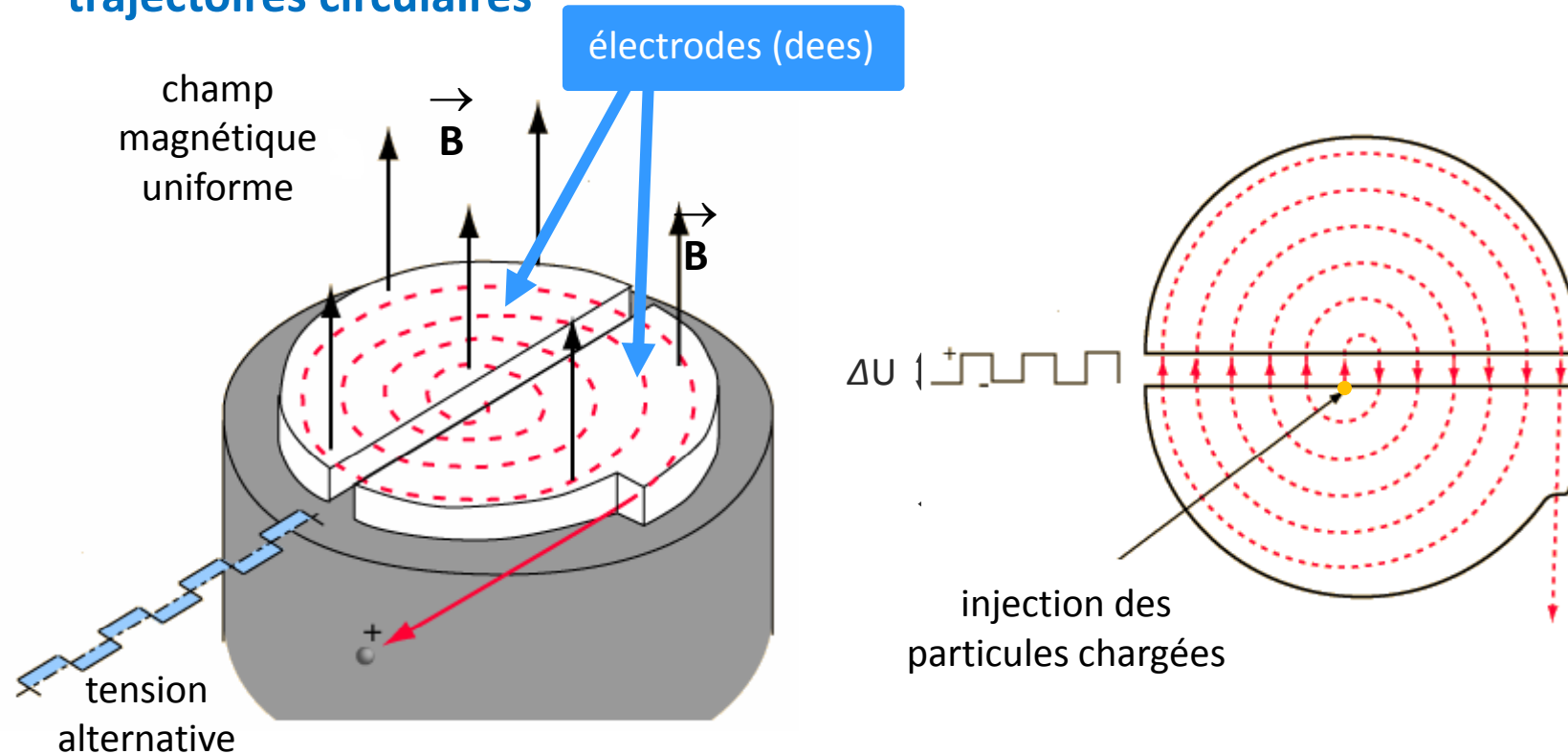
accélérateur linéaire de stanford



accélérateur linéaire à électrons
déclenche par laser
(©CNRS/IN2P3 (2000))

2.3 Cyclotron

- plusieurs accélérations consécutives par de faibles différences de potentiel, trajectoires circulaires



- entre les dees:** accélération électrostatique
- dees:** mouvement circulaire uniforme induit par champ magnétique

paramètres d'un cyclotron

énergie acquise entre les deux électrodes $\Delta E = q\Delta U$

rayons des trajectoires circulaires $R_n = \frac{mv_n}{qB}$

vitesse de la particule

pulsation du cyclotron $\omega_{cyclotron} = \frac{v_n}{R_n} = \frac{qB}{m}$

condition de synchronisation $\omega_{cyclotron} = \omega_0 = \frac{2\pi}{T}$

pulsation signal électrique accélérateur

énergie totale acquise: keV – MeV

au delà de 50 MeV

comportement relativiste des particules
⇒ déphasage



cyclotron médical

2.4 Synchro-cyclotron

- **grande énergie:** correction déphasage relativiste par variation fréquence ω_0

- ✱ énergie totale acquise ~ 100 MeV

- ✱ appareils de grandes dimensions

2.5 Synchrotron

- **grande énergie:** variations du champ magnétique de façon à garder le rayon de la trajectoire R constant

- ✱ énergie totale acquise **très grande**

- ✱ amélioration des performances en injectant des particules pré-accélérées par un accélérateur linéaire



ESRF (Grenoble)
(European Synchrotron Radiation Facility)

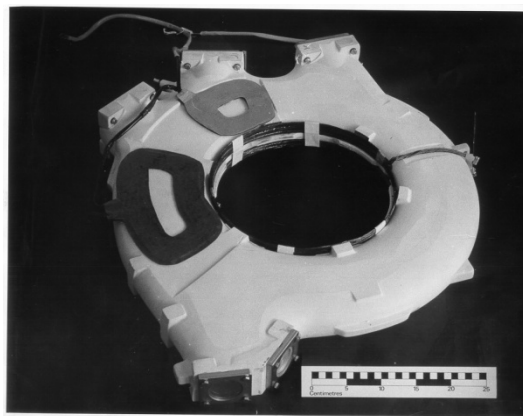
2.6 Bêtatron

- grande énergie: variations du champ magnétique de façon à garder le rayon de la trajectoire R constant

- ✱ énergie totale acquise ~ 100 MeV

- ✱ accélérateur d'électrons

- Production de rayons X



Bêtatron donut 35 MeV (1940)

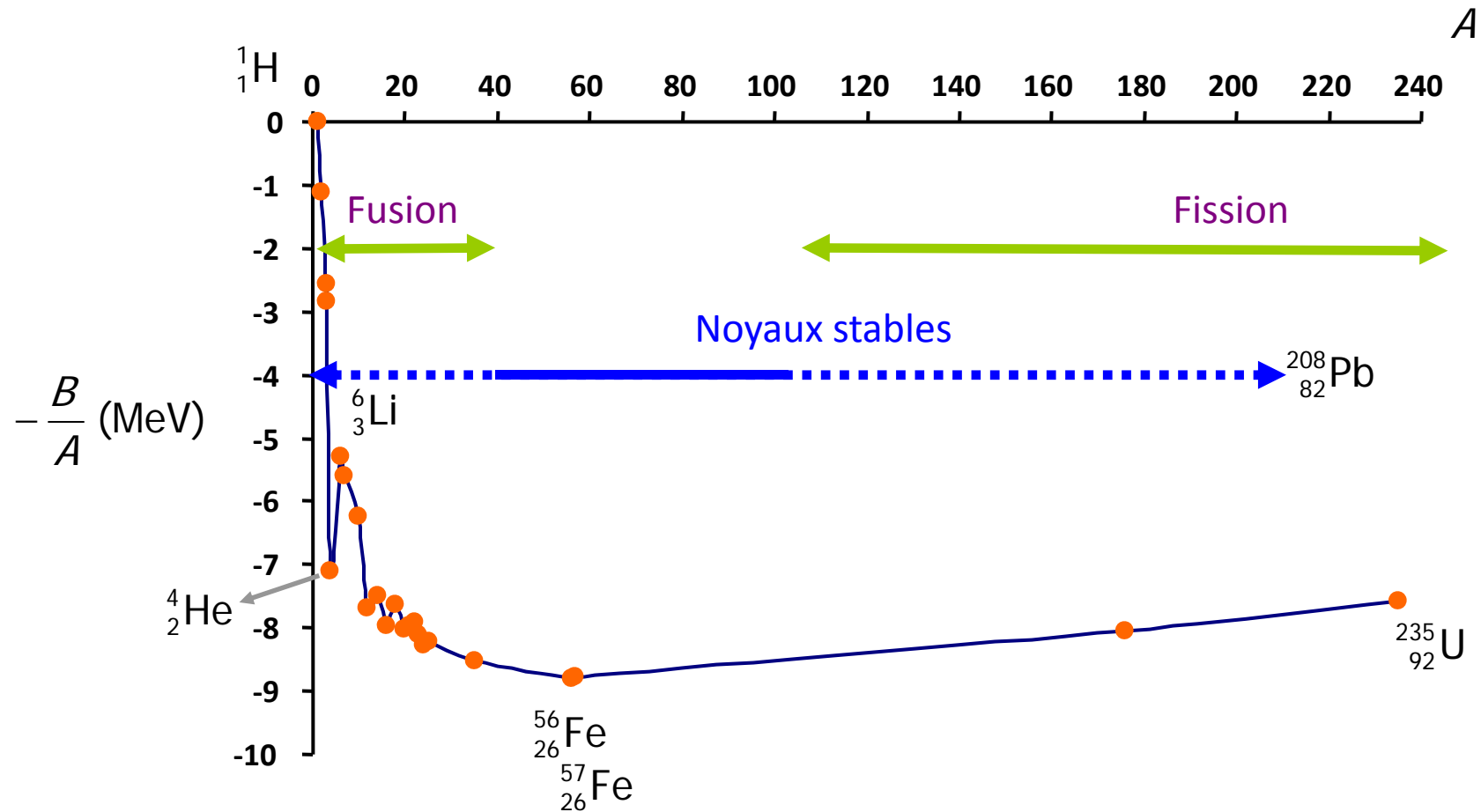


1^{er} Bêtatron de D. Kerst (1940)

3. La fission nucléaire

3.1 Réaction de fission

noyau lourd ($Z > 90$) \rightarrow Plusieurs noyaux légers (2 ou 3) + Neutrons



3.1.1 Fission spontanée

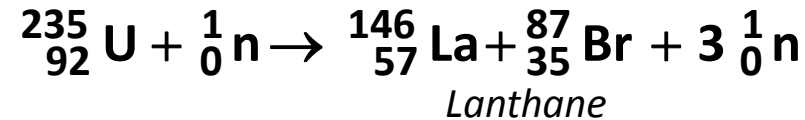
● fission du noyau sans perturbation extérieure

nucléide	probabilité de fission par désintégration (%)	nombre de neutrons émis par fission
Uranium ^{235}U	7.10^{-9}	1,86
Uranium ^{238}U	$5,4.10^{-5}$	2,07
Plutonium ^{239}Pu	$3,1.10^{-10}$	2,16
Plutonium ^{240}Pu	$5,7.10^{-6}$	2,21
Californium ^{252}Cf	3,09	3,73

3.1.2 Fission provoquée

● faible apport énergie extérieure

✱ neutrons lents (réaction neutronique)



● énergie libérée par la réaction

$$Q = (M_{\text{U}} - M_{\text{La}} - M_{\text{Br}} - 2m_{\text{n}})c^2$$

$$Q \approx (235,12 - 145,99 - 86,94 - 2 \times 1,01) \times 931,5 \approx \mathbf{158,4 \text{ MeV}}$$

$$\rightarrow \mathbf{0,7 \text{ MeV / nucléon}} (= 158,4 / 235)$$

✱ énergie considérable

✱ ~ 80 % sous forme d'énergie cinétique

● section efficace σ élevée pour neutrons lents

✱ forte probabilité de réaction

● émission neutrons

✱ réactions possibles neutrons formés avec noyaux voisins

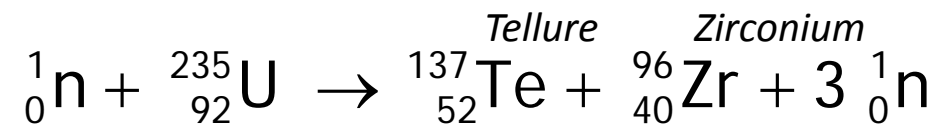
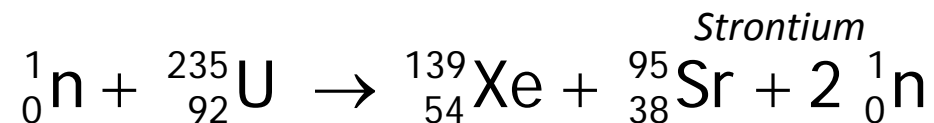
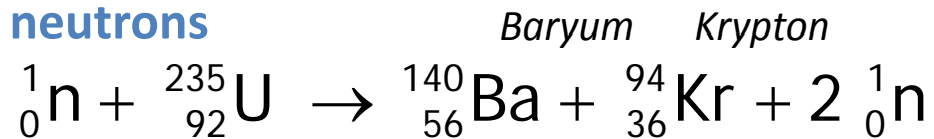
✱ réaction en chaîne

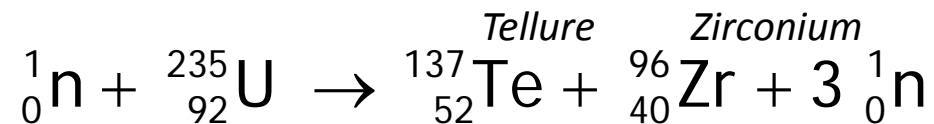
● différents produits de fission possibles (même noyau initial)

✱ noyaux formés souvent radioactifs

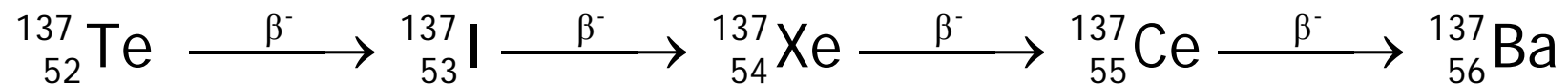
✱ réactions possibles avec neutrons

✱ baisse rendement





❁ **dégradation radioactive des produits de fission :**



❁ **bilan énergie dégagée :**

Type d'énergie		Énergie (MeV)	% de l'énergie totale (204 MeV)
Fission	Énergie cinétique des fragments de fission	166	81,5
	Énergie cinétique des neutrons de fission	5	2,5
	Énergie des γ de fission	8	3,9
	Total	179	87,7
Radioactivité des produits de fission	Énergie des particules β	7	3,4
	Énergie des particules γ	7	3,4
	Énergie des neutrinos	11	5,5
	Total	25	12,3

3.2 Réacteur nucléaire

● dispositif dans lequel une réaction nucléaire en chaîne peut être initiée, modérée et contrôlée

● **combustible Uranium 235**

■ obtenu à partir Uranium naturel par enrichissement

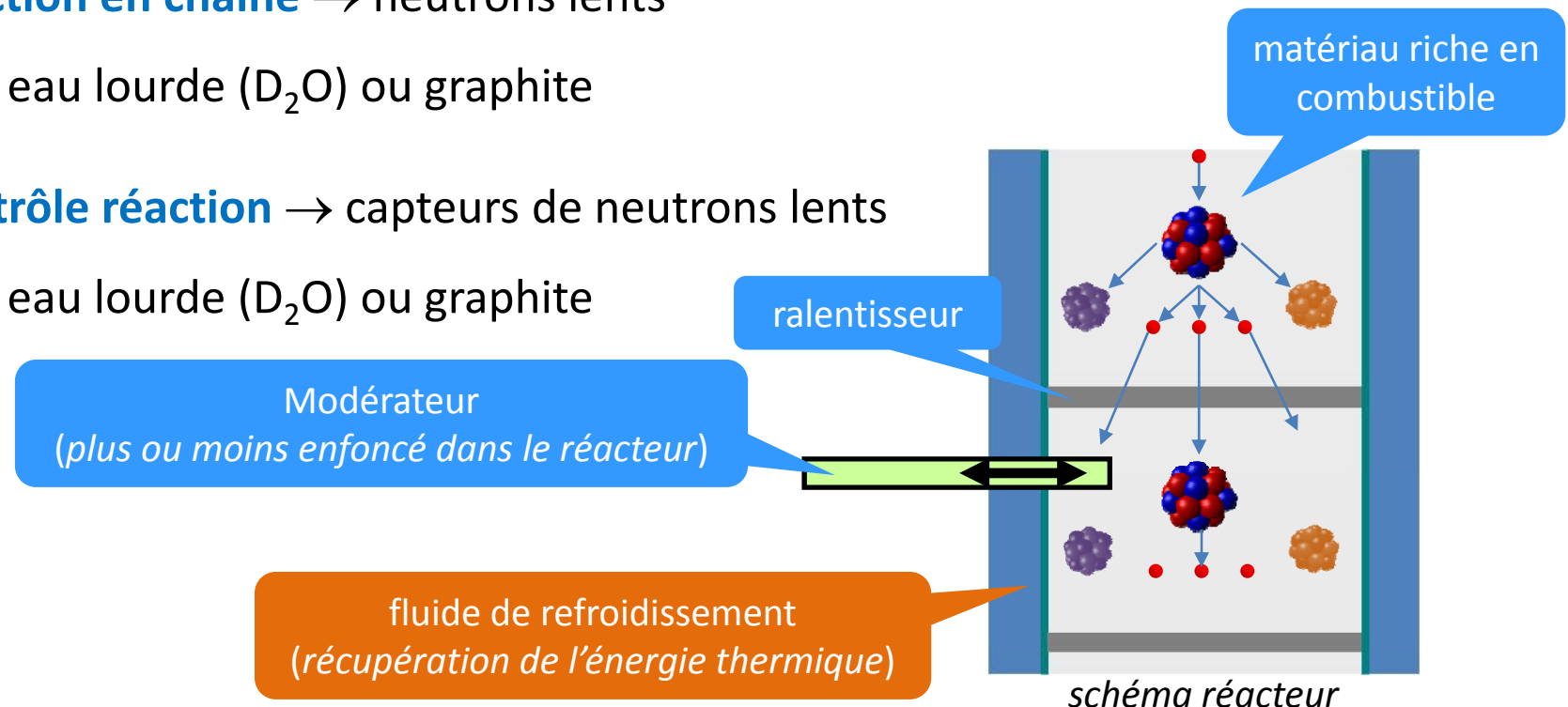
● **réaction en chaîne** → neutrons lents

■ eau lourde (D_2O) ou graphite

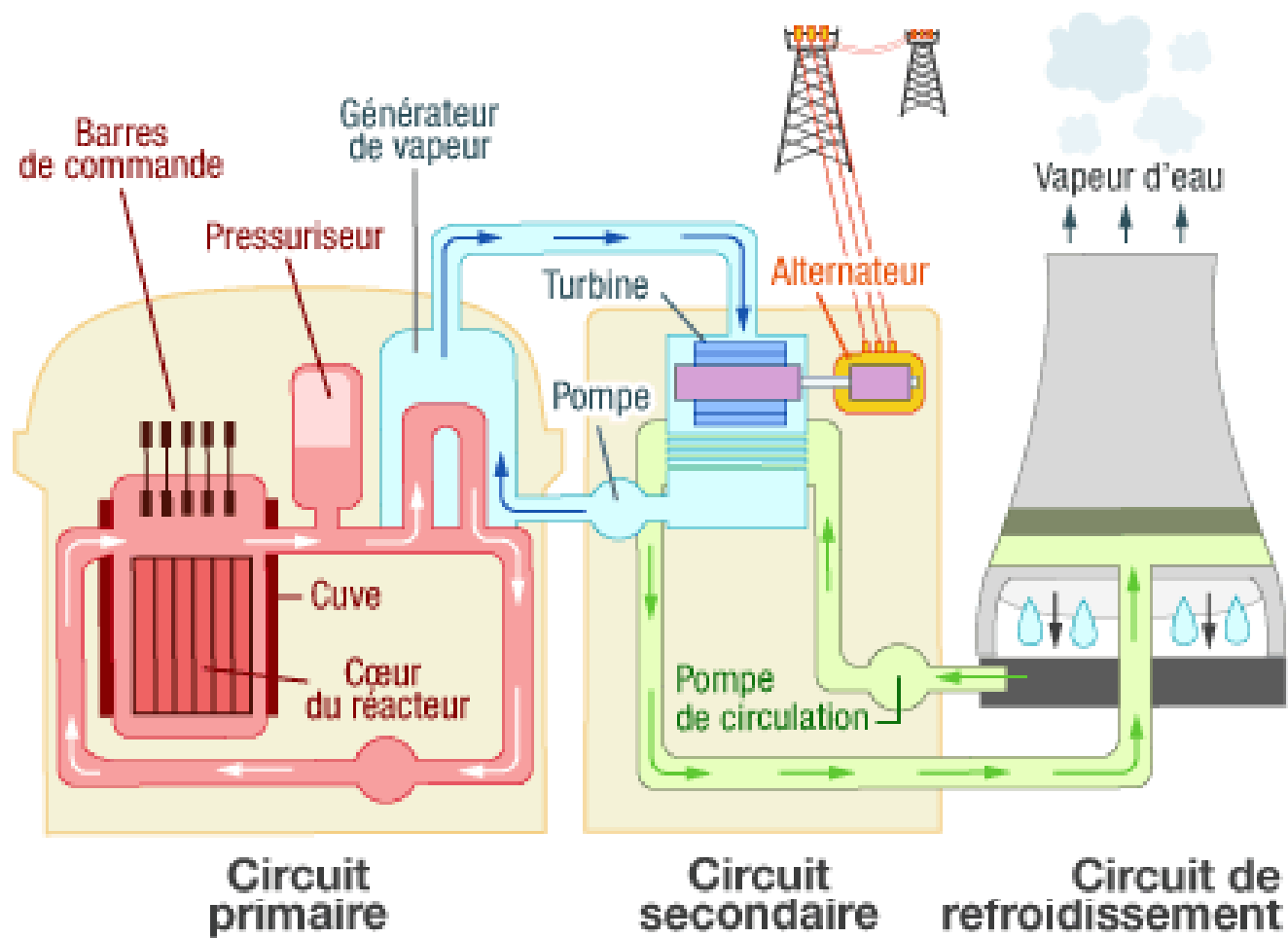
● **contrôle réaction** → capteurs de neutrons lents

■ eau lourde (D_2O) ou graphite

Uranium naturel	
^{235}U	0,72 %
^{238}U	97,27 %



● centrale nucléaire



4. Réaction en chaîne non contrôlées

4.1 Fission

🔴 conditions

☼ pas de modérateur

☼ facteur de multiplication $k > 1$

$$k = \frac{\text{Nombre de neutrons utiles à la } (n+1)^{\text{ème}} \text{ génération}}{\text{Nombre de neutrons utiles à la } n^{\text{ème}} \text{ génération}}$$

☼ **masse combustible > masse critique**

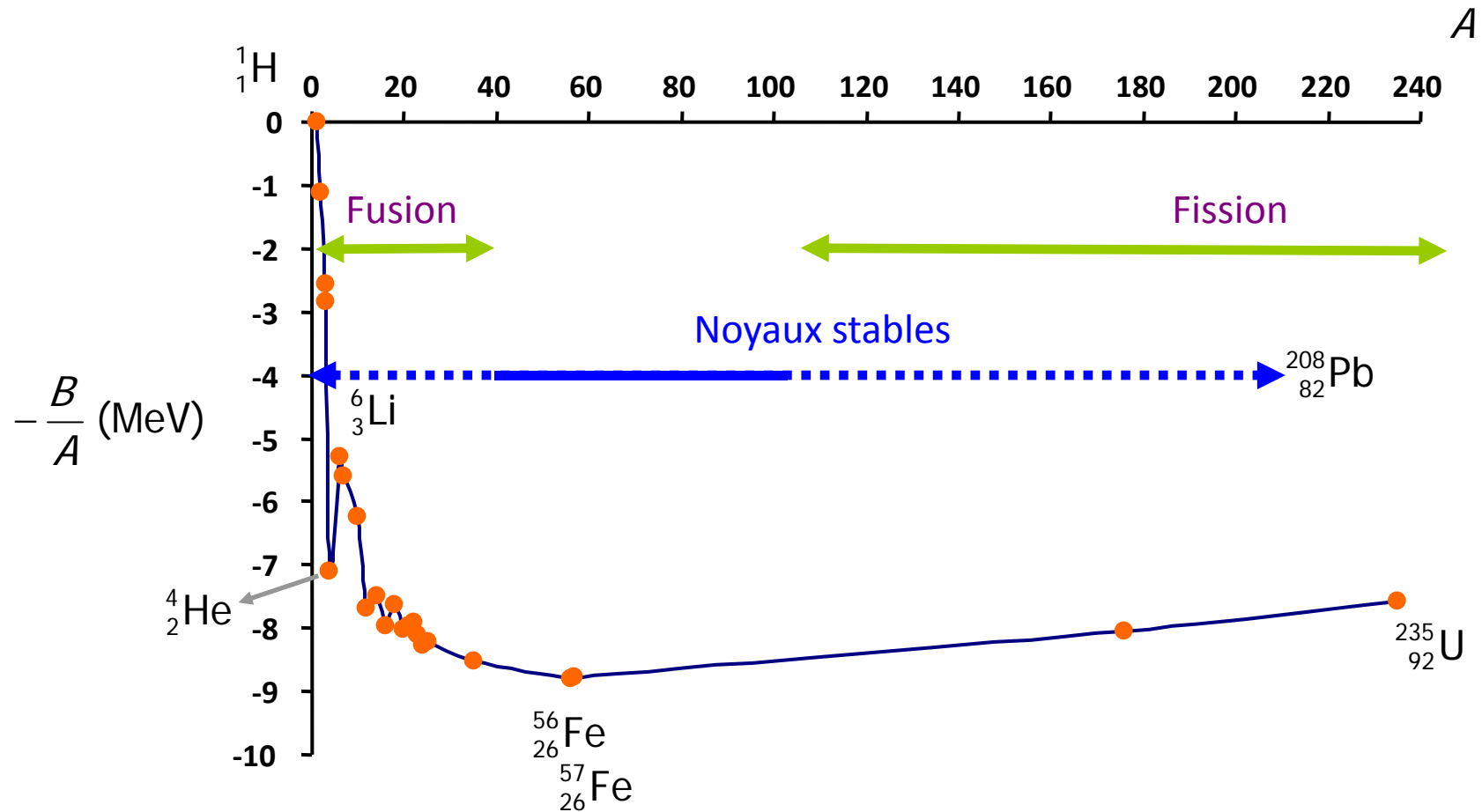
masse critique: masse au-dessous de laquelle la réaction ne peut diverger

▶ **emballement réaction**: explosion (*bombe atomique*)

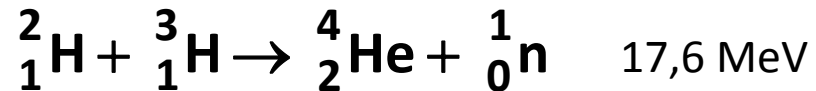
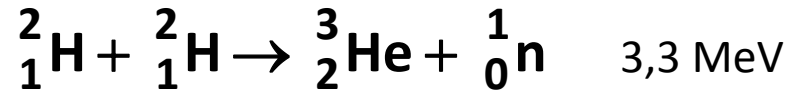
🔴 **explosion nucléaire**: énergie ~ **1000 tonnes TNT**

4.2 Fusion

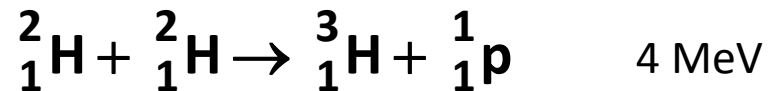
noyaux légers ($Z < 60$) \rightarrow 1 noyau lourd + neutrons ou protons



● réactions produisant des neutrons



● réactions produisant des protons



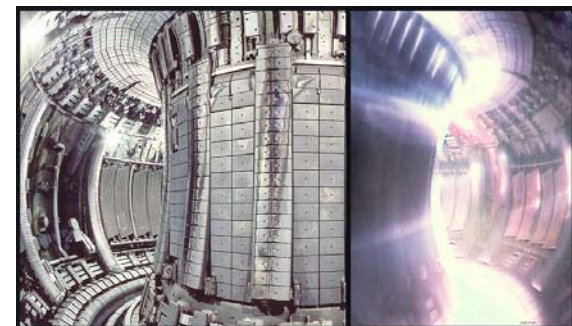
● réactions très énergétiques (*plus énergétiques fission*)

● fusion non contrôlée

- ☼ réactions de fusion naturelles: **soleil**, étoiles
- ☼ bombe thermonucléaire

● fusion contrôlée

- ☼ axe de recherche (Tokamak et Stellarator)
- ☼ moins de déchets + combustible inépuisable H



JET tokamak (Joint European Torus)

5. Préparation des radionucléides artificiels

5.1 Activité de la source formée

● soit un noyau radioactif B^\otimes



☼ A et C stable

☼ B radionucléide artificiel (constante radioactive λ)

section efficace
de réaction

● nombre de noyaux B^\otimes formés par unité de temps = $\Phi \sigma N_A$

flux de projectiles (neutrons)
nombre de projectiles par unité de
temps et par unité de surface

$$\sigma = \frac{\text{nombre de réactions par noyau cible par unité de temps}}{\text{nombre de photons incidents par m}^2 \text{ (flux incident)}}$$

● variation du nombre de noyaux B^\otimes formés

$$\frac{dN_B}{dt} = \Phi \sigma N_A - \lambda N_B$$

● par intégration

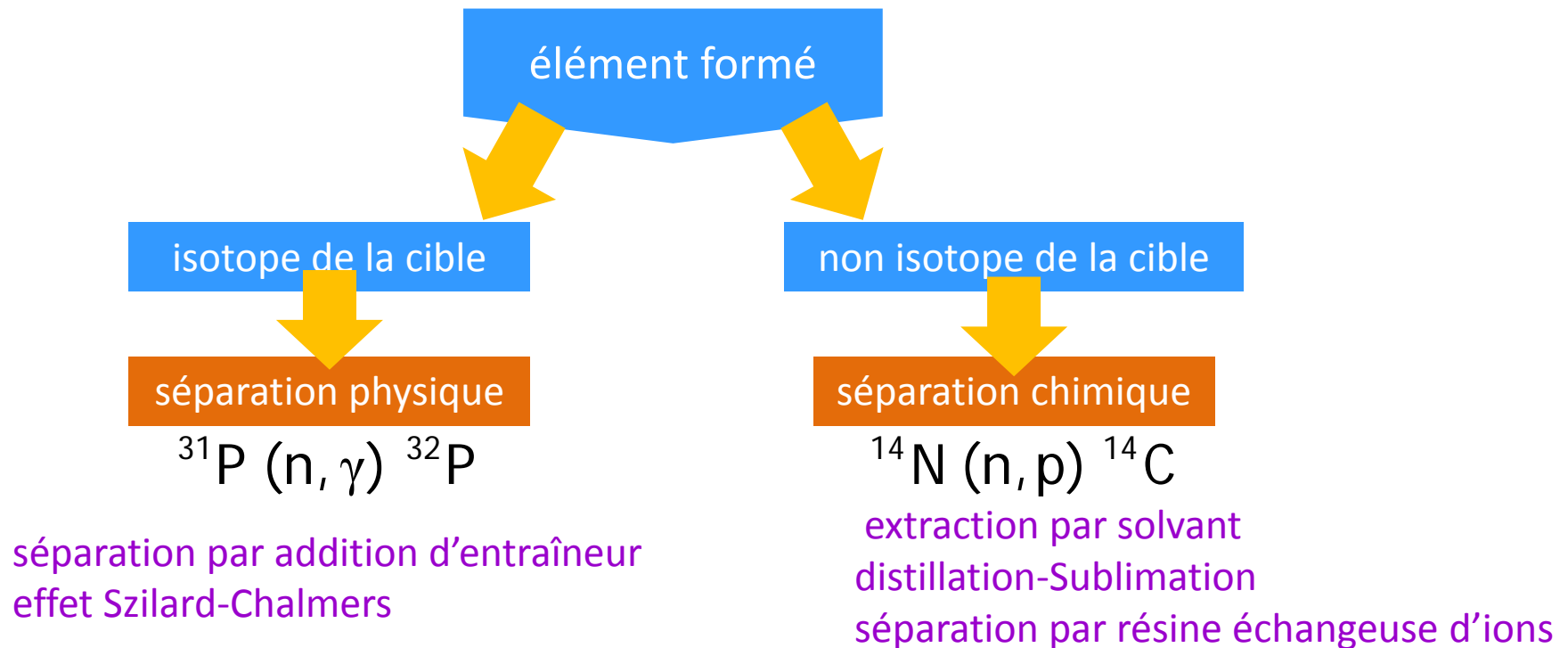
☼ $N_A \sim \text{constant}$ (*peu de noyaux irradiés*) $\rightarrow \Phi \sigma N_A \sim \text{constant}$

$$N_B = \frac{\Phi \sigma N_A}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

● activité

$$A_B = \Phi \sigma N_A (1 - e^{-\lambda t})$$

5.2 Séparation des radioéléments



5.3 Utilisations des radioéléments

● applications biologiques et médicales

- ✱ traceurs (*diagnostic, exploration fonctionnelle*)

- ✱ radiothérapie (*traitement*)

● applications chimiques

- ✱ polymérisation

- ✱ marquage

- ✱ micro-analyse

● applications industrielles

- ✱ stérilisation

- ✱ gammagraphie

- ✱ autres...

6. Datation

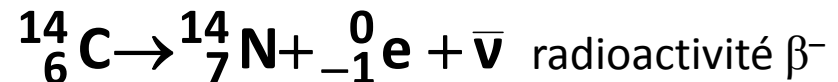
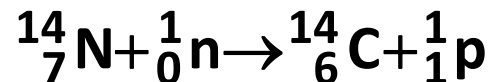
6.1 Datation ^{14}C

- mesure variation de l'activité d'un élément entre deux instants → temps écoulé entre ces deux instants

- ✱ 1946: idée utilisation rapport isotopique $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ pour dater débris végétaux recueillis (*W.F. Libby*)
- ✱ ~1950: appareils de mesures de sensibilité suffisante pour la mise en application de cette méthode de datation

- origine du ^{14}C

- ✱ réactions nucléaires dans la haute atmosphère



neutrons cosmiques ou issus de réactions entre les rayonnements cosmiques et les molécules de l'atmosphère

- ^{14}C absorbé par les organismes vivants ($^{14}\text{CO}_2$)

- ✱ dissolution CO_2 dans l'eau puis absorption de l'eau par les êtres vivants
- ✱ photosynthèse
- ✱ respiration et nutrition

• activité du C : **13,56 dpmg** (*désintégrations par minute et par gramme*)

• Abondances naturelles des isotopes du C :

- ^{12}C : 98,89 %
- ^{13}C : 1,108 %
- ^{14}C : **$1,17 \cdot 10^{-10}$ %**

• période du ^{14}C

$T = 5700 \pm 30$ ans

• datation

activité actuelle

activité à la mort de l'être vivant
supposée constante et homogène

• loi de décroissance radioactive

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

• temps écoulé depuis la mort de l'être vivant:

$$t = \frac{T}{\ln(2)} \ln\left(\frac{A_0}{A}\right)$$

• corrections

- A_0 n'est pas constant (*activité humaine, ...*)
- A_0 n'est pas homogène
- fractionnement isotopique (*activité variable d'une espèce à l'autre*)

• précision

- méthode fiable jusqu'à 30000 ans (précision 2000 à 3000 ans)
- inutilisable au-delà de 50000 ans

6.2 Autres méthodes de datation par radioactivité

Méthode	Datation	Matériaux
U-Pb Uranium-Plomb	$10 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^9$ ans	Roches
$^{206}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}$	$100 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^9$ ans	Roches
U-Th Uranium-Thorium	0-400000 ans	Ossements
K-Ar Potassium-Argon	0- $1 \cdot 10^9$ ans	Roches
$^{39}\text{Ar} - ^{40}\text{Ar}$	0- $1 \cdot 10^9$ ans	Roches
Rb-Sr Rubidium-Strontium	$10 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^9$ ans	Roches
Sm-Nd Samarium-Néodyme	$100 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^9$ ans	Roches
^{14}C	0-50000 ans	Restes organiques