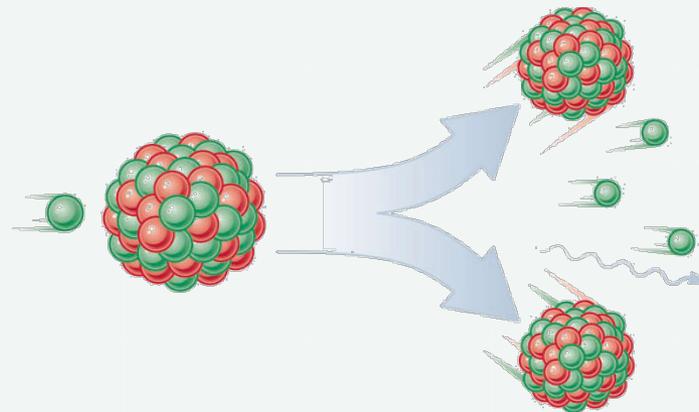


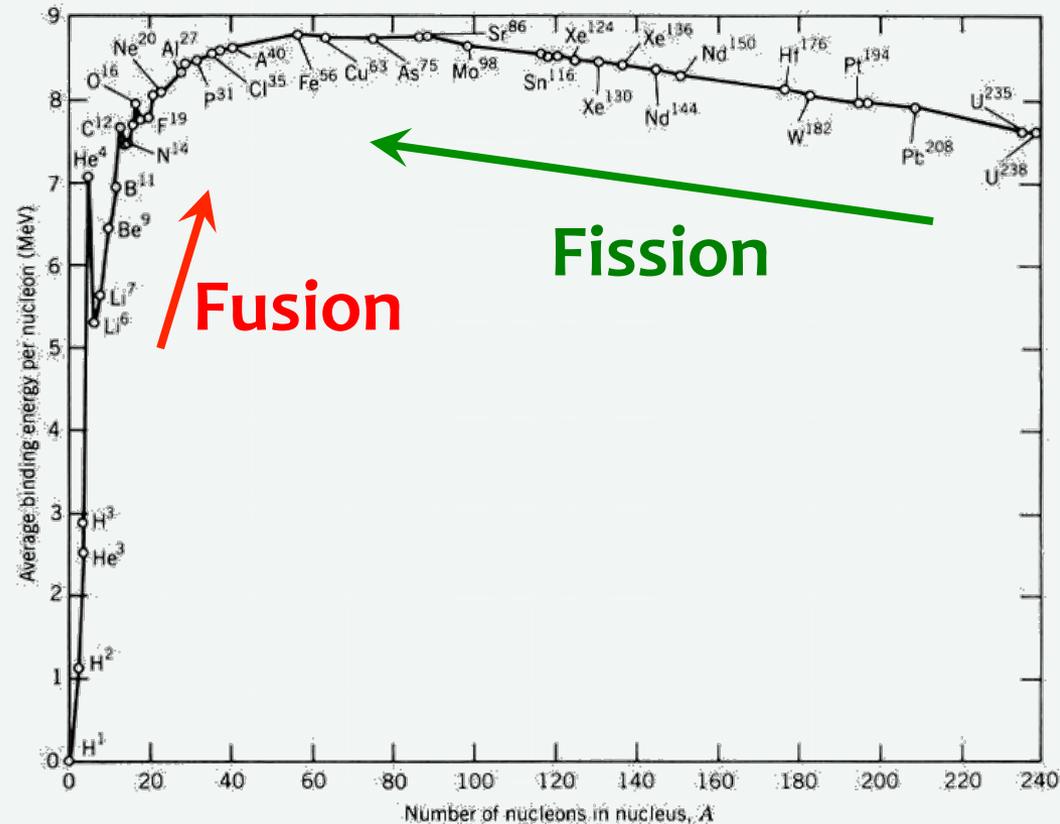
Chapitre 4

La fission des noyaux, source d'énergie



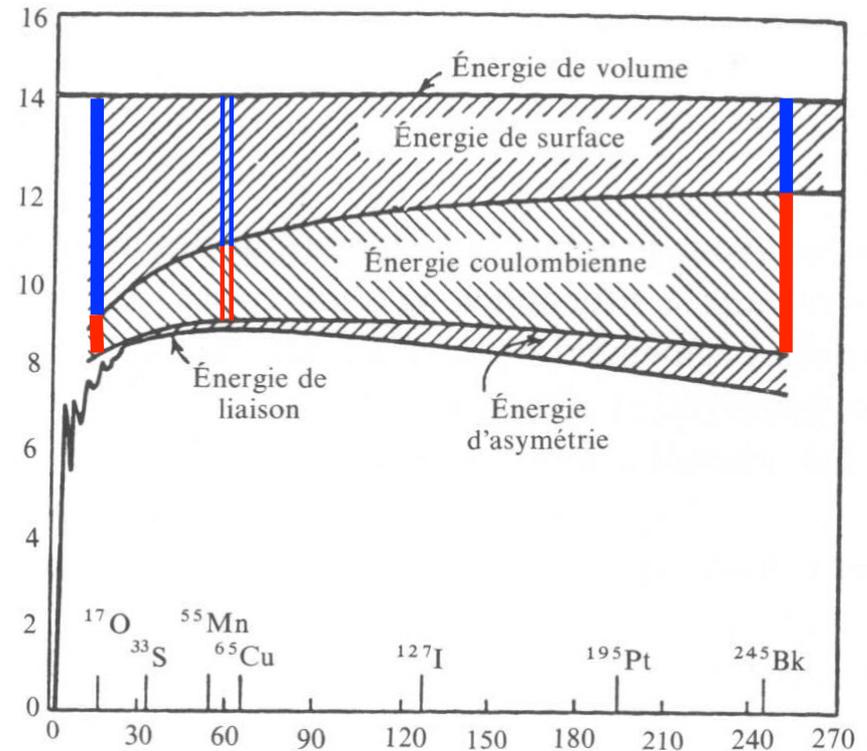
Introduction

- La matière nucléaire la plus stable est aux alentours de $A=60$.
 $B/A \approx 8.5$ MeV
- L'énergie est libérée dans
 - La fission d'un noyau lourd en deux noyaux de taille moyenne
 - La fusion de deux noyaux légers en un noyau de taille moyenne



Fission

- 🌐 Origine : compétition entre énergie de **surface** and énergie **coulombienne**
- 🌐 **La Fission** se produit car l'énergie de répulsion coulombienne des protons est réduite si le noyau se scinde en deux noyaux plus petits.
L'énergie de surface s'accroît dans le processus mais l'effet est plus faible



Fission spontanée



- Elle se produit si

$$Q_f = M(X) - M(Y) - M(W) = B(A_1, Z_1) + B(A_2, Z_2) - B(A, Z) > 0$$

- définissons: $y = \frac{A_1}{A} = \frac{Z_1}{Z}$ and $1 - y = \frac{A_2}{A} = \frac{Z_2}{Z}$ (le ratio Z/N est conservé)

- Donc:

$$Q_f = u_s A^{2/3} \left(1 - y^{2/3} - (1 - y)^{2/3} \right) + u_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left(1 - y^{5/3} - (1 - y)^{5/3} \right)$$

- L'énergie libérée est maximale si $\frac{\partial Q_f}{\partial y} = 0$

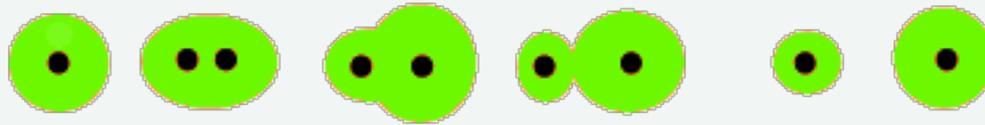
$$\frac{\partial Q_f}{\partial y} = \frac{2}{3} u_s A^{2/3} \left(-y^{-1/3} + (1 - y)^{2/3} \right) + \frac{5}{3} u_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left(-y^{2/3} + (1 - y)^{2/3} \right) = 0$$

se produit si $y=1/2$

- Pour la fission symétrique ($y=1/2$), l'énergie libérée est $Q_f^{\text{sym}} = 0.37 u_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 0.26 u_s A^{2/3}$
- Exemple: pour ${}^{238}\text{U}$, $Q_f \approx 200 \text{ MeV} \sim 10^6 \times$ l'énergie libérée dans une réaction chimique

Barrière de fission

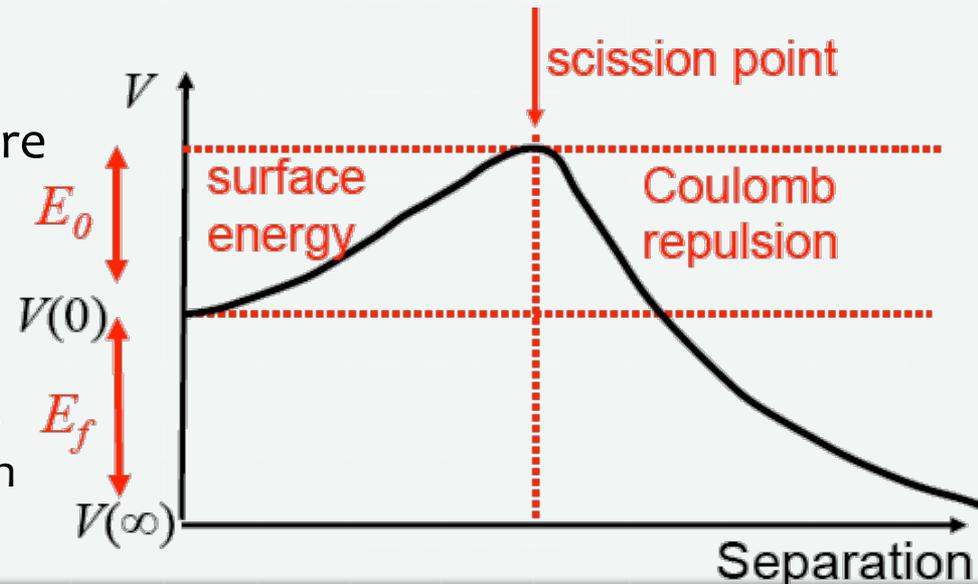
Pour fissionner, le système doit subir un processus de déformation



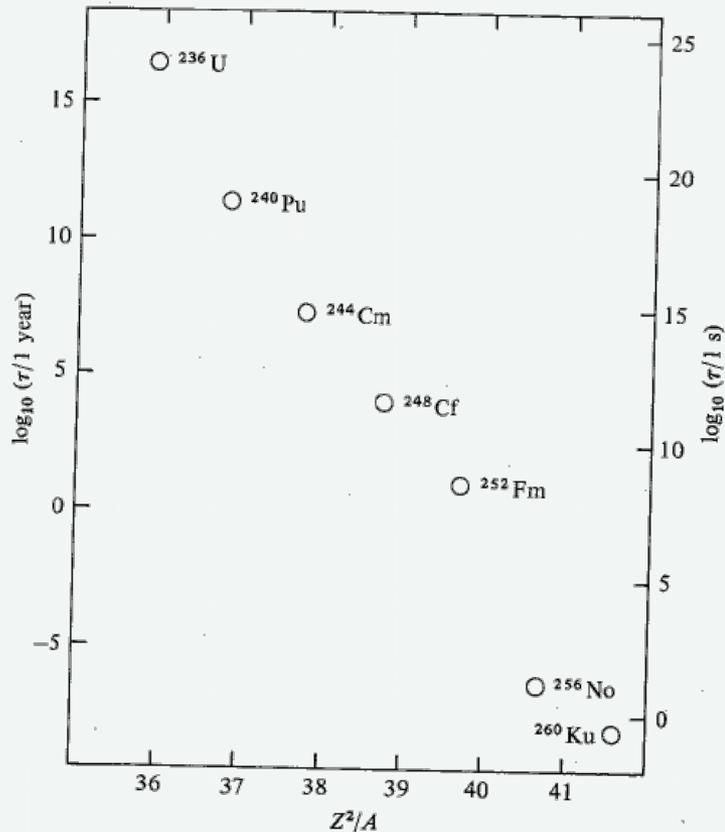
Dans un premier temps, l'énergie de surface s'accroît, mais l'énergie coulombienne n'est pas encore trop réduite. Après la séparation des deux fragments de fission (au point de scission), la répulsion coulombienne prend le dessus

⇒ Au cours du processus de fission, le système doit franchir une barrière coulombienne. (similaire à la désintégration α)

E_f = énergie libérée
→ Energie cinétique des fragments
 E_0 = Energie d'activation de la fission de l'ordre de 6 MeV dans ^{236}U

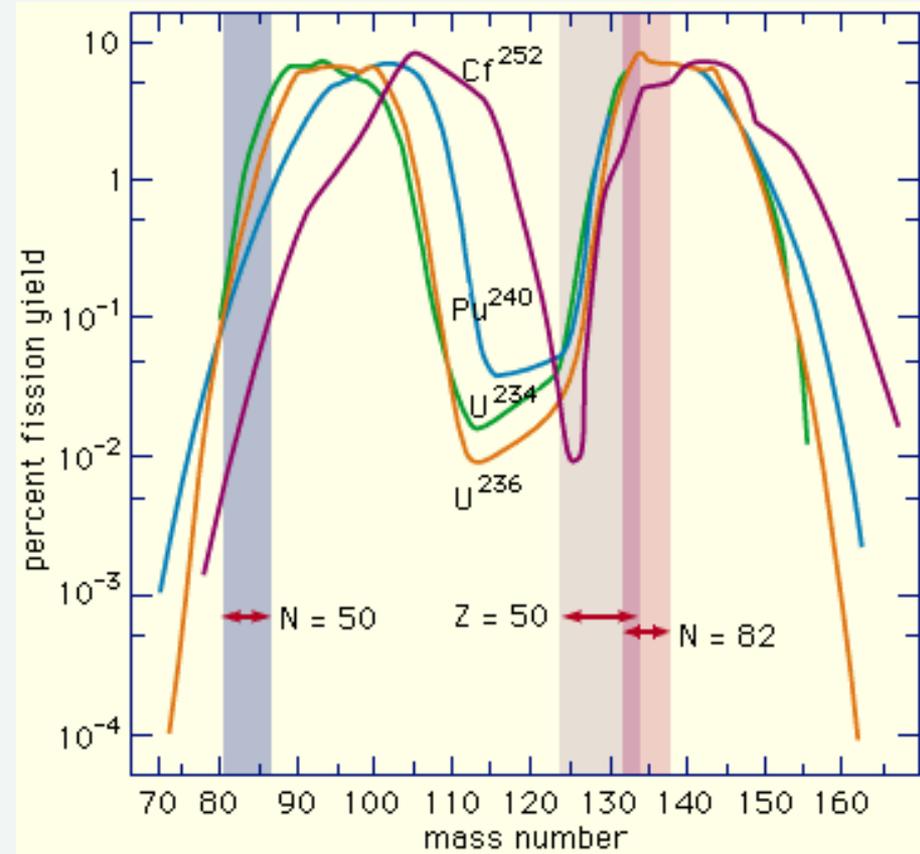


Résultats expérimentaux



Temps de vie de la fission spontanée

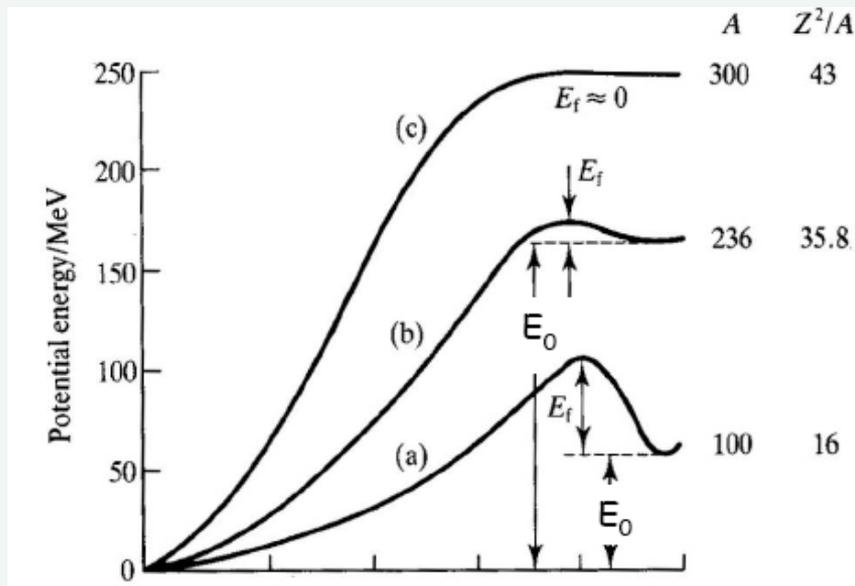
décroit rapidement avec Z^2/A



Noyaux produits

l'énergie libérée est maximale pour la fission symétrique, mais il en est de même pour la barrière coulombienne. En fait la fission est asymétrique+ émission de neutrons

- La probabilité de franchissement de la barrière par effet tunnel dépend de $Z^2/A \rightarrow$ **Energie d'activation plus faible pour les noyaux lourds**



Evolution de la barrière de fission

- La probabilité de franchissement dépend exponentiellement de la masse du fragment
 \rightarrow grande masse : petite probabilité d'effet tunnel
 La fission est bien moins probable que la désintégration α .

exemple pour ^{238}U

$$T_{1/2}(\alpha) = 4.5 \cdot 10^9 \text{ ans}$$

$$T_{1/2}(\text{fission}) = 7.3 \cdot 10^{15} \text{ ans}$$

la fission est 10^6 fois moins probable que α

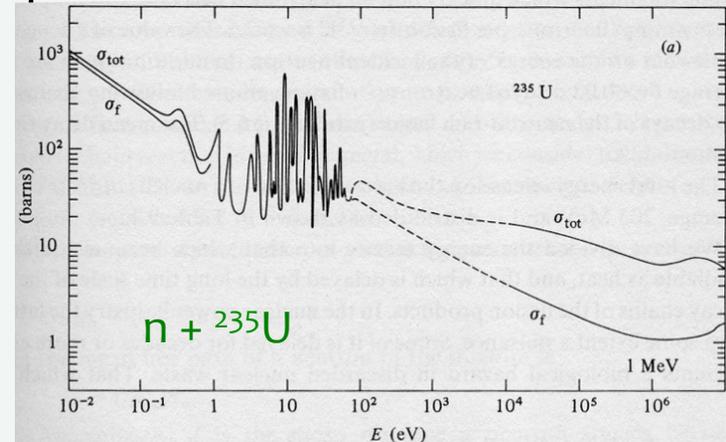
La fission spontanée est un mode de désintégration très rare pour les Noyaux stables (ou à très longue durée de vie)

Fission induite

- Même à basse énergie, les neutrons peuvent être absorbés par les noyaux (pas de barrière coulombienne)

Les neutrons de très basse énergie peuvent avoir une grande probabilité d'absorption

$$\sigma(n, \gamma) \propto \frac{1}{v}$$



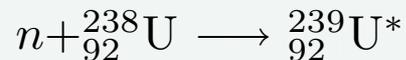
- Après la capture de neutrons, le noyau composé est créé dans un état excité
 - Si l'énergie de l'état excité est basse (plus basse que la hauteur de la barrière) l'émission γ est la plus probable, mais l'énergie d'excitation aide au franchissement de la barrière coulombienne.
 - Si l'énergie d'excitation est supérieure à l'énergie d'activation de la fission, E_f , la fission est le mode dominant et va se produire rapidement, même pour des neutrons de très faible énergie.
→ fission induite

Exemples dans l'Uranium

- Dans ^{235}U , L'énergie d'activation E_0 est de l'ordre de 6 MeV.
L'absorption d'un neutron par ^{235}U , donne un noyau composé $^{236}\text{U}^*$ avec un énergie d'excitation supérieure à E_0
→ fission induite par des neutrons thermiques ($E_n \approx 1/40$ eV)



- Dans ^{238}U , l'énergie d'activation E_0 est aussi de l'ordre de 6 MeV

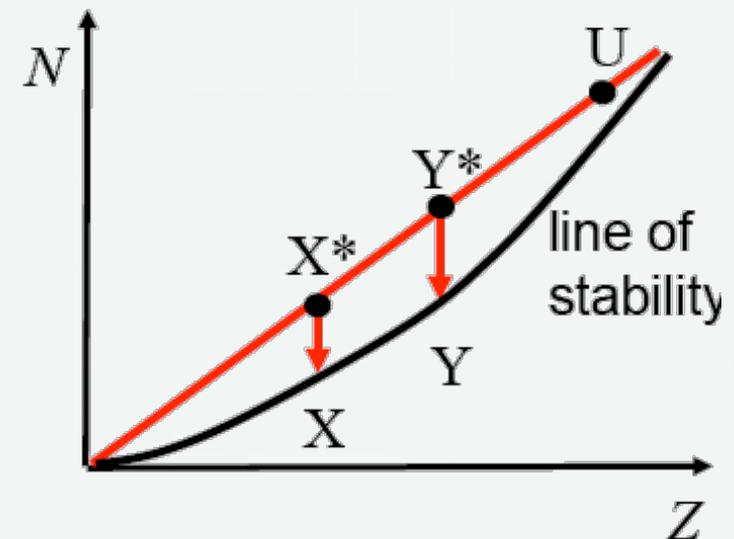
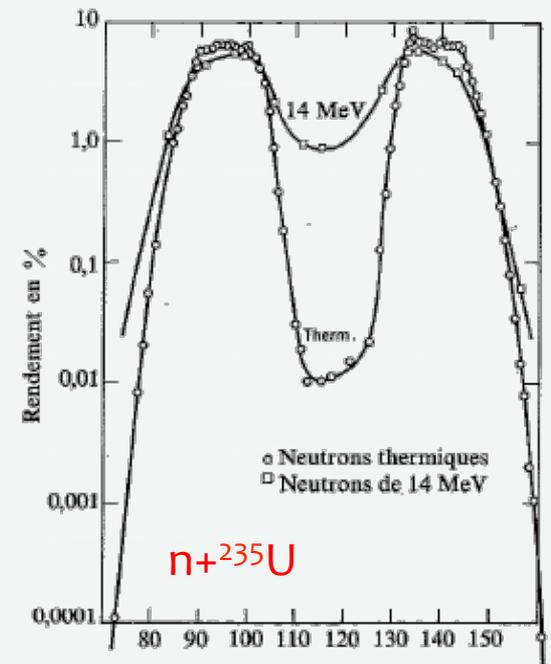


mais l'énergie d'excitation dans ^{239}U est plus faible :

neutrons thermiques	$E_n = 0.025\text{eV}$	$E^* \approx 5 \text{ MeV}$	pas de fission thermique
neutrons rapides	$E_n > 1 \text{ MeV}$	$E^* \approx 6 \text{ MeV}$	Fission immédiate

- ^{235}U est un isotope plus intéressant pour les réacteurs à fission

- Fission asymétrique (en général).
 - Moins asymétrique pour les neutrons rapides.
- Les fragments X^* , Y^* ont tendance à avoir le même ratio Z/N que le parent
 - Noyaux riches en neutron qui émettent des **neutrons immédiats** ($10^{-16}s$)
- X and Y subissent des désintégrations β plus lentement (peuvent aussi émettre des neutrons)
 - émission de **neutrons retardés** (~ 1 neutron retardé pour 100 fissions)
- Grande variété de noyaux radioactifs produits; potentiellement dangereux
 - **problème des déchets nucléaires**



Réaction en chaîne

- Les neutrons issus de la fission peuvent être utilisés pour induire d'autres fissions
→ réaction en chaîne
- Une réaction en chaîne peut être entretenue si au moins un neutron par fission induit un autre processus de fission

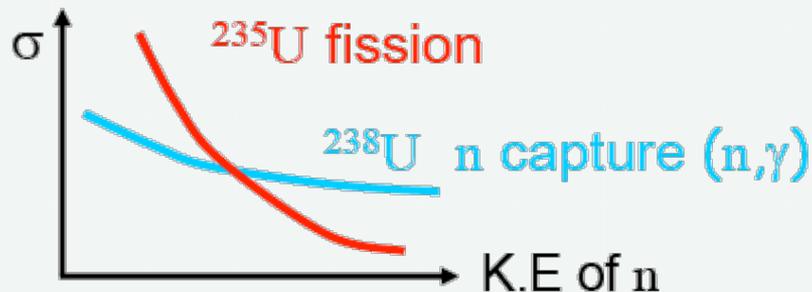
Soit k le nombre de neutrons d'une fission en induisant une autre

$k=1$	$k<1$	$k>1$
Critique	Sous-critique	Sur-critique

- Les neutrons immédiats sont rapides $\langle E \rangle \approx 2 \text{ MeV}$ → Leur probabilité de capture est faible.
Il faut les ralentir avant qu'ils s'échappent

Réacteur à fission

- Besoin d'une réaction en chaîne en régime critique ($k=1$)
- Besoin d'un modérateur pour ralentir des neutrons rapides via des collisions élastiques. Nécessite un noyau léger (Carbone, eau lourde D_2O , ...)
- Combustible : problème, L'uranium naturel est est 99.3% ^{238}U et 0.7% ^{235}U , et la probabilité de capture est grande pour ^{238}U . Encore nécessité de ralentir les neutrons rapides pour qu'ils ne soient pas absorbés par ^{238}U .



- Besoin de contrôler le nombre de neutrons par absorption (Bore, Cadmium) (*cf séance précédente*)

Panorama des déchets radioactifs

Produits de fission de durée de vie moyenne

	$T_{1/2}$ (yr)	Yield(%)	Q (keV)
^{155}Eu	4.76	0.08	252
^{85}Kr	10.76	0.22	687
$^{113\text{m}}\text{Cd}$	14.1	0.01	316
^{90}Sr	28.9	4.51	2826
^{137}Cs	30.23	6.34	1176
$^{121\text{m}}\text{Sn}$	43.9	0.01	390
^{151}Sm	90	0.53	77

Produits de fission de longue durée de vie

	$T_{1/2}$ (10^6 yr)	Yield(%)	Q (keV)
^{99}Tc	0.211	6.13	294
^{126}Sn	0.230	0.11	4050
^{79}Se	0.295	0.04	151
^{93}Zr	1.53	5.45	91
^{135}Cs	2.3	6.91	269
^{107}Pd	6.5	1.25	33
^{129}I	15.7	0.84	194

- Plus un isotope se désintègre rapidement, plus il sera radioactif
- Les propriétés chimiques des éléments radioactifs vont déterminer la mobilité de la substance, et sa probabilité de dissémination dans l'environnement.

- Que se passe-t-il si le contrôle des neutrons échoue ?
Définissons $N(t)$, le nombre de neutron au temps t , $(k-1)$ la variation du nombre de neutron en un cycle, et $\tau (=10^{-3})$ le temps moyen pour un cycle (fission \rightarrow fission)

$$N(t + dt) = N(t) + (k - 1)N(t) \frac{dt}{\tau}$$

$$\implies dN = (k - 1)N \frac{dt}{\tau} \quad \implies \int_{N(0)}^{N(t)} dN = (k - 1)N \frac{dt}{\tau}$$

$$N(t) = N(0)e^{(k-1)t/\tau}$$

Croissance exponentielle

Si $k=1.01$, $\tau=10^{-3}s$, après $t=1s$, $N(t)/N(0)=e^{10} \approx 22000$

Note: Un réacteur à Uranium ne va pas exploser si il entre en régime sur-critique. Au fur et à mesure qu'il s'échauffe, l'énergie cinétique des neutrons croît et la probabilité de capture chute. Le réacteur se stabilise à très haute température \Rightarrow **Il fond**

- La solution est d'utiliser les neutrons retardés (retard moyen $\sim 13s$).
Le réacteur est construit pour être sous critique avec les neutrons immédiats et utilise les neutrons retardés pour atteindre le régime critique.