

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

Les réacteurs nucléaires

- ❑ **Introduction : fission, réaction nucléaire et section efficace**

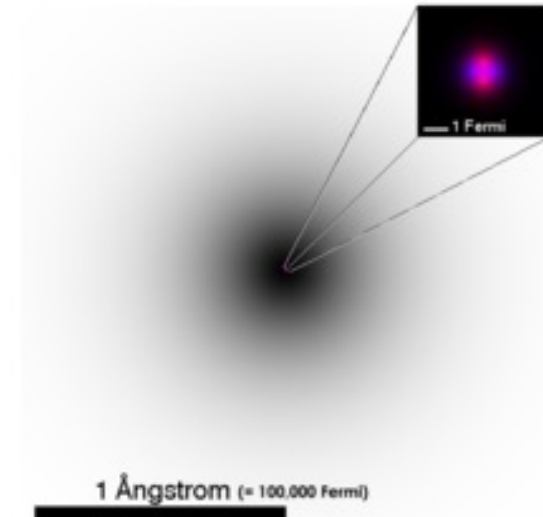
- ❑ **Base de physique neutronique**
 1. La réaction en chaîne
 2. Ralentissement et thermalisation des neutrons
 3. Evolution du combustible (équations de Bateman)

- ❑ **Principe de fonctionnement d'un réacteur**
 1. Principe général d'un réacteur
 2. Les différents circuits
 3. La sûreté nucléaire

□ Introduction : fission, réaction nucléaire et section efficace

Rappel

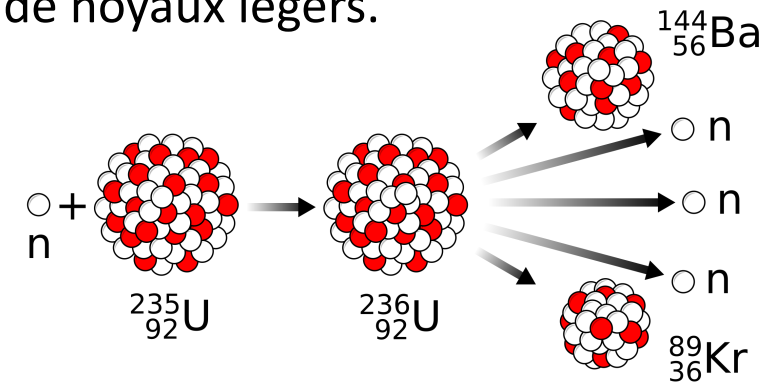
- ❑ La cohésion des noyaux est assurée par l'interaction nucléaire forte.
- ❑ On représente l'intensité de cette interaction grâce au concept d'énergie de liaison.
- ❑ Plus un noyau possède une énergie de liaison grande, plus il est lié et donc stable.
- ❑ Pour comparer des noyaux entre eux on utilise la grandeur E_{liais}/A .
- ❑ Si on peut former par réaction nucléaire des noyaux plus stables que les noyaux initiaux, alors il y a dégagement d'énergie.
- ❑ On utilise aujourd'hui de manière industrielle seulement la fission car c'est la réaction nucléaire exoénergétique la plus facile à faire. Mais il existe aussi la fusion de noyaux légers.



- ❑ La fission d'un noyau lourd fournit environ 200 MeV.

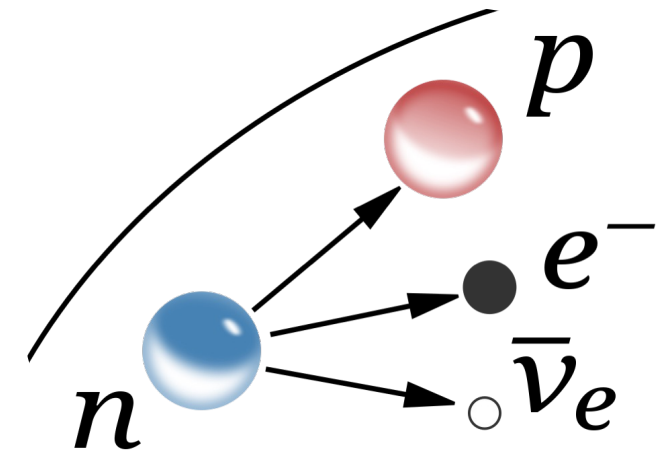
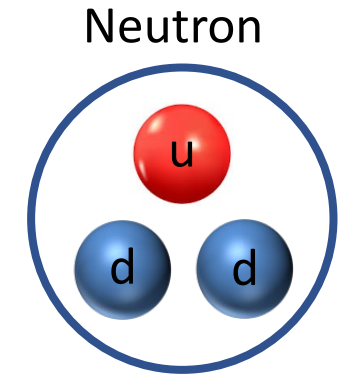
- ❑ Dans REP 900 MWe il y a : 10^{20} fissions/s.

- ❑ Dans la nature l'uranium naturel est composé de deux isotopes : ${}^{235}_{92}\text{U}$ (0,7%) et ${}^{238}_{92}\text{U}$ (99,3%)



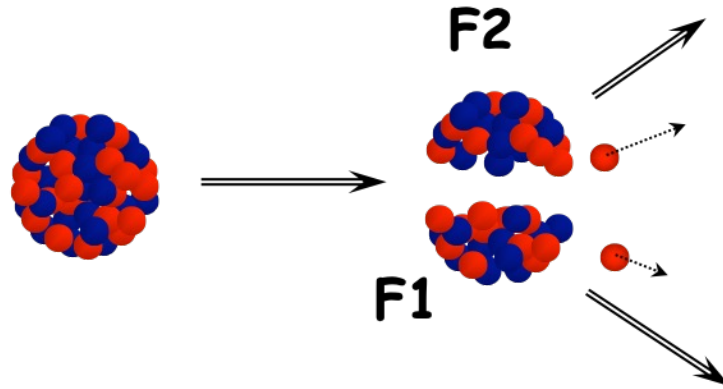
Le neutron

- ❑ Le neutron est un nucléon composant le cœur des noyaux atomiques. C'est un fermion de charge électrique nulle, de spin $\frac{1}{2}$ et de masse $m_n = 939.56533 \pm 0.00004 \text{ MeV}/c^2$
- ❑ Le neutron fait partie des baryons (hadron formé de 3 quarks) et est composé d'un quark up (charge $\frac{2}{3} e$) et de deux quarks down (2 charges de $-\frac{1}{3} e$).
- ❑ Le neutron est instable lorsqu'il n'est pas lié, avec une demi-vie de 12 minutes. Il se désintègre par désintégration β^- en un proton et un antineutrino.
- ❑ Le neutron fait partie des rayonnements indirectement ionisants.
- ❑ Propriété importante : charge électrique nulle ne ressent pas la répulsion coulombienne
 - les réactions nucléaires induites par neutron peuvent présenter des sections efficaces importantes à toute énergie, notamment à basse énergie.
 - échelle macroscopique : comportement collectif des neutrons dans le milieu suit les lois de la statistique, comme un gaz qui diffuse dans la matière.

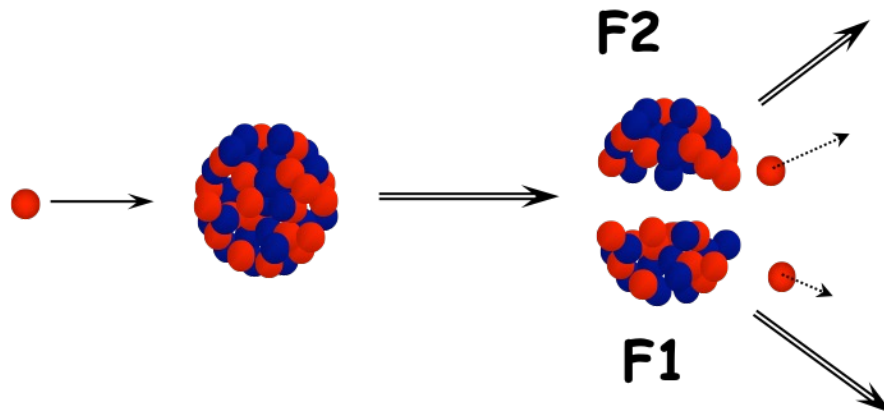


Fission spontanée et provoquée

Fission spontanée



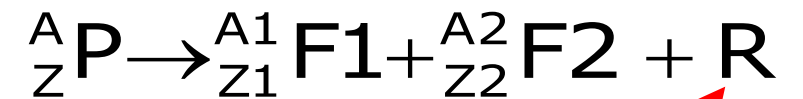
Fission provoquée



❑ C'est le processus utilisé dans les réacteurs nucléaires aujourd'hui.

❑ 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.



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

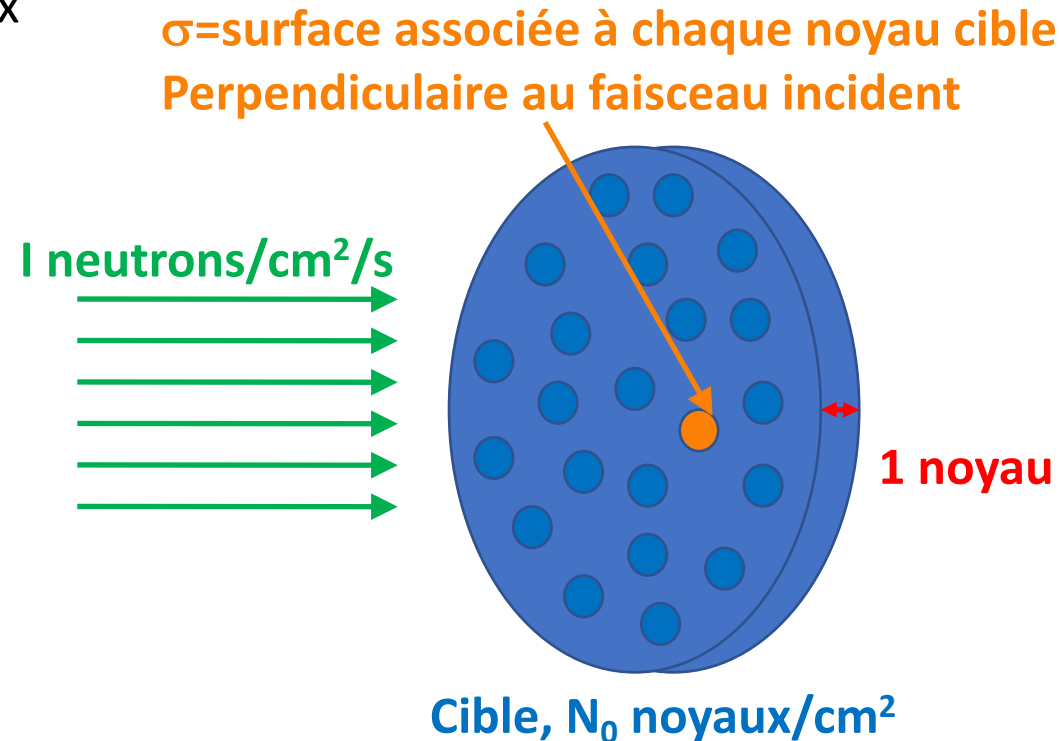
Neutrons et γ
émis initialement

Notion de section efficace

- ❑ Section efficace caractérise la probabilité d'interaction entre deux particules.
- ❑ Le taux de réaction s'écrit (nombre de réactions/m³/s) :
- ❑ Le nombre d'interaction neutron-noyau est proportionnel à :
 - l'intensité du faisceau de neutrons (n/m²/s)
 - la densité de noyaux N₀ (nombre de noyaux/m³)
 - la section efficace σ (m²)
- ❑ Le taux de réaction s'écrit (nombre de réactions/m³/s) :

$$R = \sigma \times I \times N_0$$

- ❑ On peut donc interpréter le concept de section efficace comme étant la surface de choc associée à chaque noyau, perpendiculairement à la direction d'un neutron incident.
- ❑ Unité : le barn: 1 barn=10⁻²⁴ cm²



$$\sigma(E, \text{noyau}, \text{type interaction})$$

Section efficace macroscopique

- ❑ Interaction avec une cible épaisse :
- ❑ Soit $I(x)$ le nombre de particules ayant traversé sans interaction l'épaisseur x .
- ❑ Dans l'épaisseur dx on va observer $I(x)Ndx\sigma$ réactions.
- ❑ Par conséquent l'expression de la variation de $I(x)$ sur dx sera:

$$dI(x) = -I(x)N\sigma dx$$

- ❑ En intégrant sur la l'épaisseur x , on obtient l'évolution de la valeur de I en fonction de l'épaisseur :

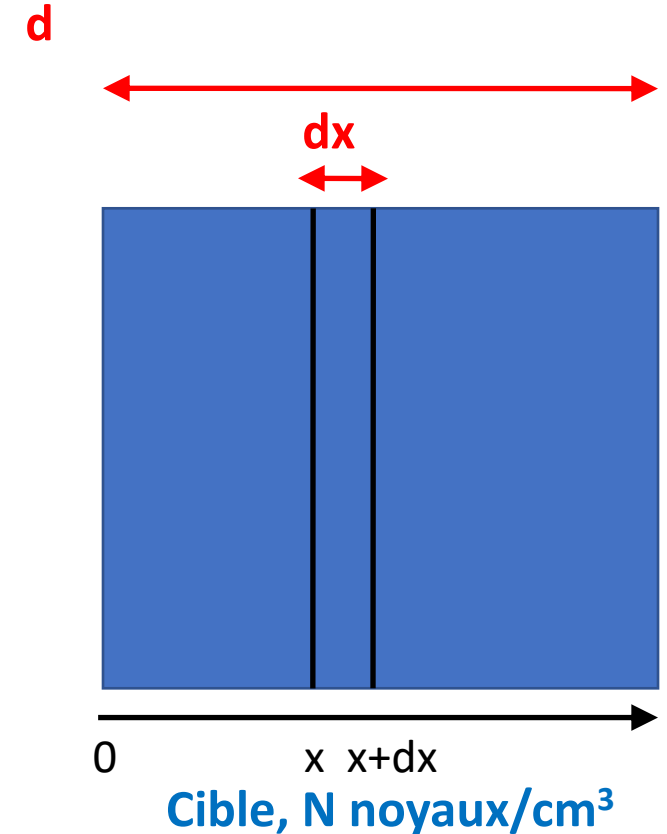
$$I(x) = I_0 e^{-N\sigma x}$$

Σ = section efficace macroscopique

- ❑ Σ caractérise pour un matériau donné la probabilité d'interaction nucléaire.

- ❑ Unité : cm^{-1}

I neutrons/ cm^2/s



Ordre de grandeur σ_a

- Exemples de section efficace d'absorption pour des neutrons thermiques:

Noyau	Section efficace (barn)
Hydrogène naturel	0,332
Deutérium	0,000506
Bore 10	3840
Xénon 135	2 650 000
Plomb naturel	0,178

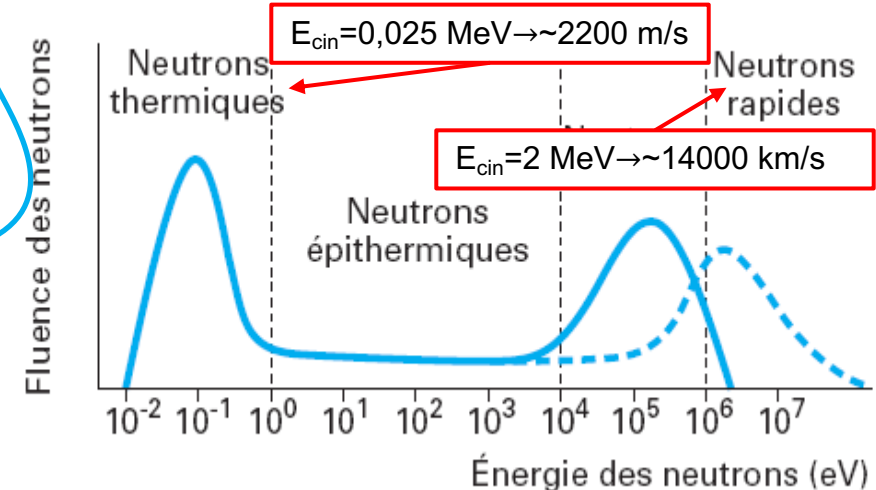
X 10

- Choix de matériaux dans un cœur de réacteur en fonction de σ_a : absorption ou modération

Classification des neutrons et interactions

- Durée entre deux interactions (REP) : 10^{-4} à 10^{-5} s
 ➔ on considère le neutron libre comme stable dans le réacteur.

Énergie	Classification
0,025 eV	thermiques
0,025-100 eV	lents
100 eV-10 keV	intermédiaires
10 keV-10 MeV	rapides
> 10 MeV	haute énergie



(Source : Techniques de l'ingénieur, Dossier BN 3490)

Ralentissement des neutrons

Diffusion élastique (n,n)
 Diffusion inélastique (n,n')

Diffusion

$$\sigma_{tot} = \sigma_d + \sigma_a = \sum \sigma_i$$

Production d'isotopes fissiles

Activation des matériaux

Processus concurrent de la fission

Capture radiative (n,γ)
 Fission (n,f)
 Emission part. chargées (n,p), (n,α)...
 Emission neutrons (n,xn)

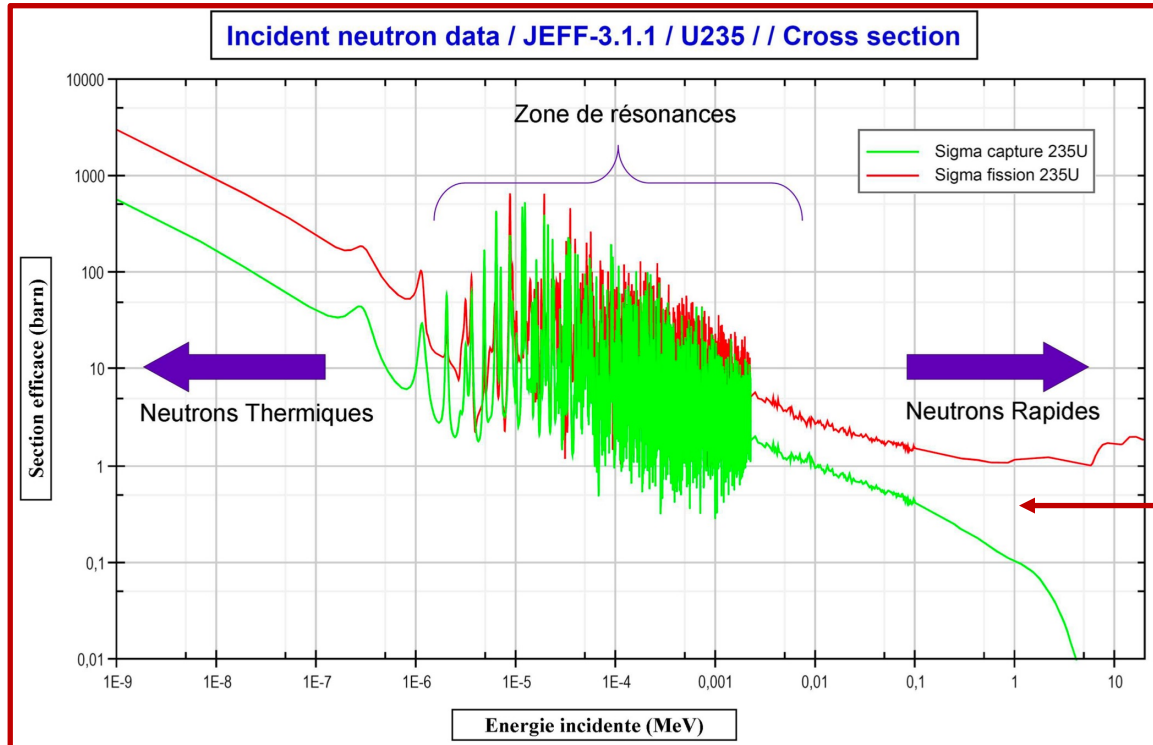
Absorption

n+noyau

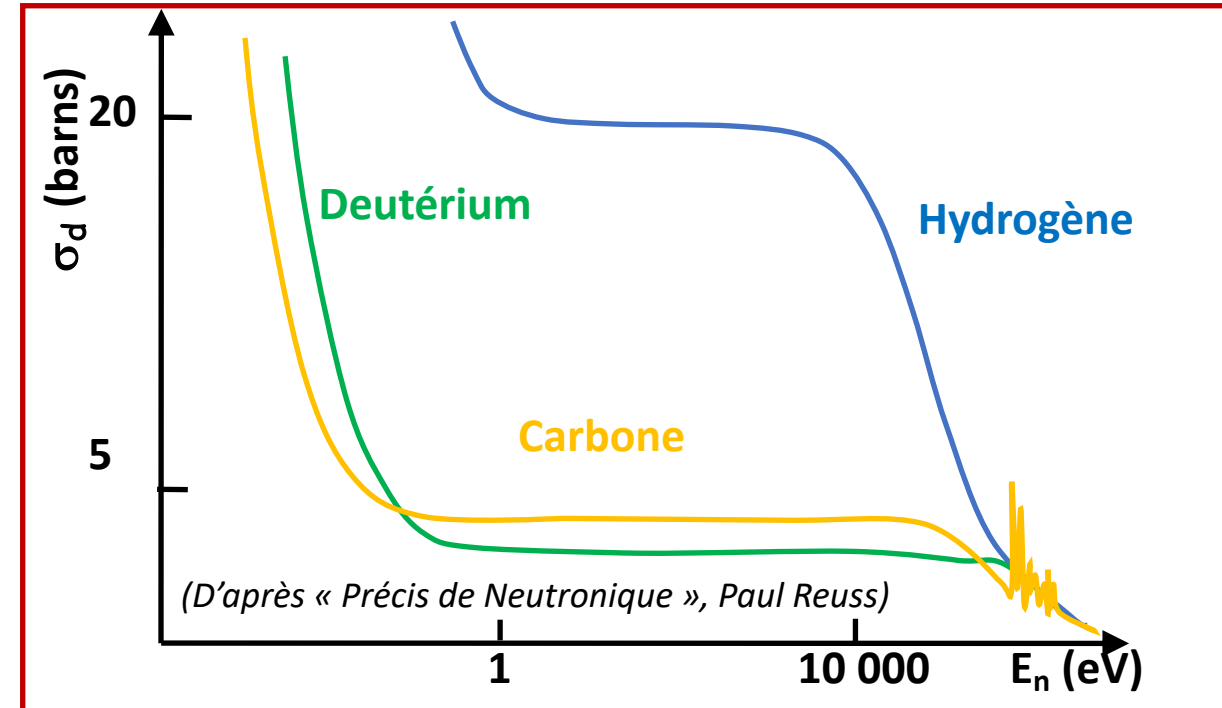
Les sections efficaces : dépendance

Section efficace de diffusion:

- pas de dépendance avec E,
- même ordre de grandeur pour tous les noyaux sauf H.



(Source, Thèse de Doctorat, René Bes, 2010, IPN Lyon)



Sections efficaces d'absorption (capture, fission,...)

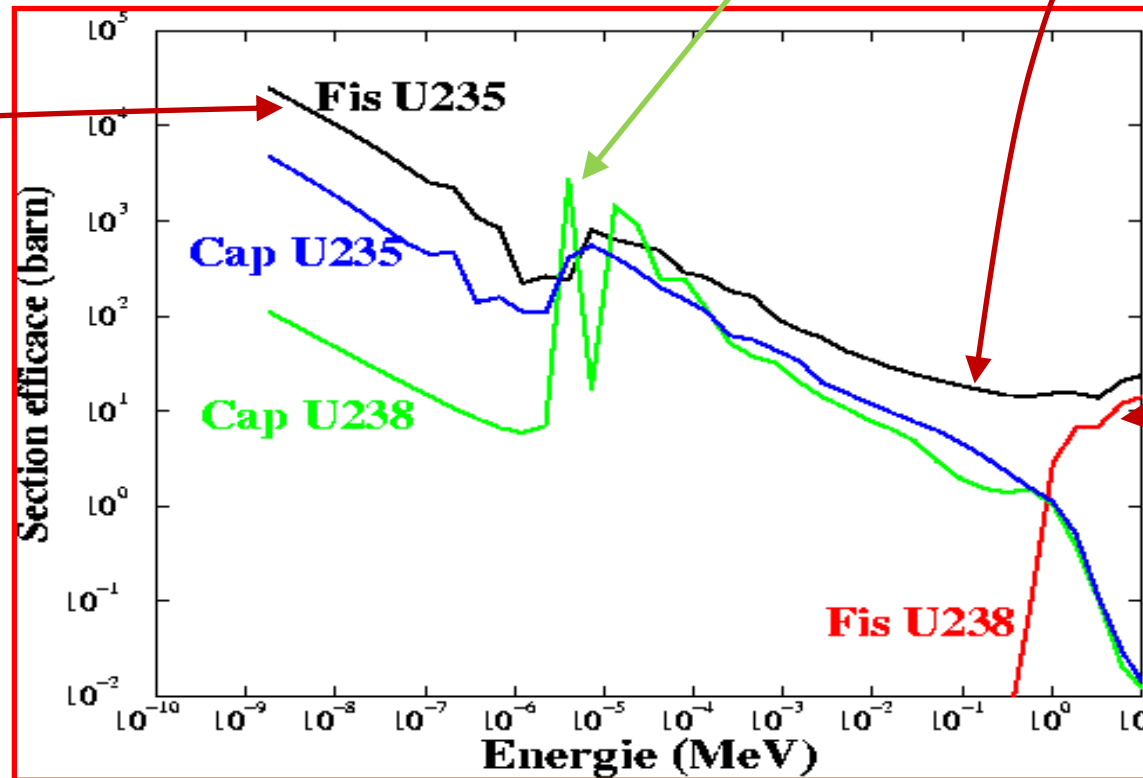
- Variation d'un noyau à l'autre,
- Variation en $1/v$ (neutron) loin des résonances,
- Résonances possibles en fonction de E.

Comparaison U-235 et U-238

❑ Quels choix possibles pour un réacteur ?

Résonance : absorption augmentée des neutrons dans le domaine épithermique

Enrichir le combustible en U-235 pour compenser la petite σ_{fission} avec les neutrons rapides.

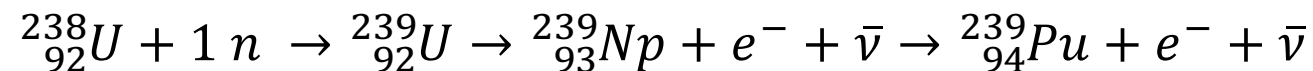


Ralentir les neutrons pour bénéficier des grandes σ_{fission} pour les neutrons thermiques.

Utiliser l'U-238 pour utiliser la σ_{fission} avec les neutrons rapides.

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

L'énergie disponible dans la fission

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

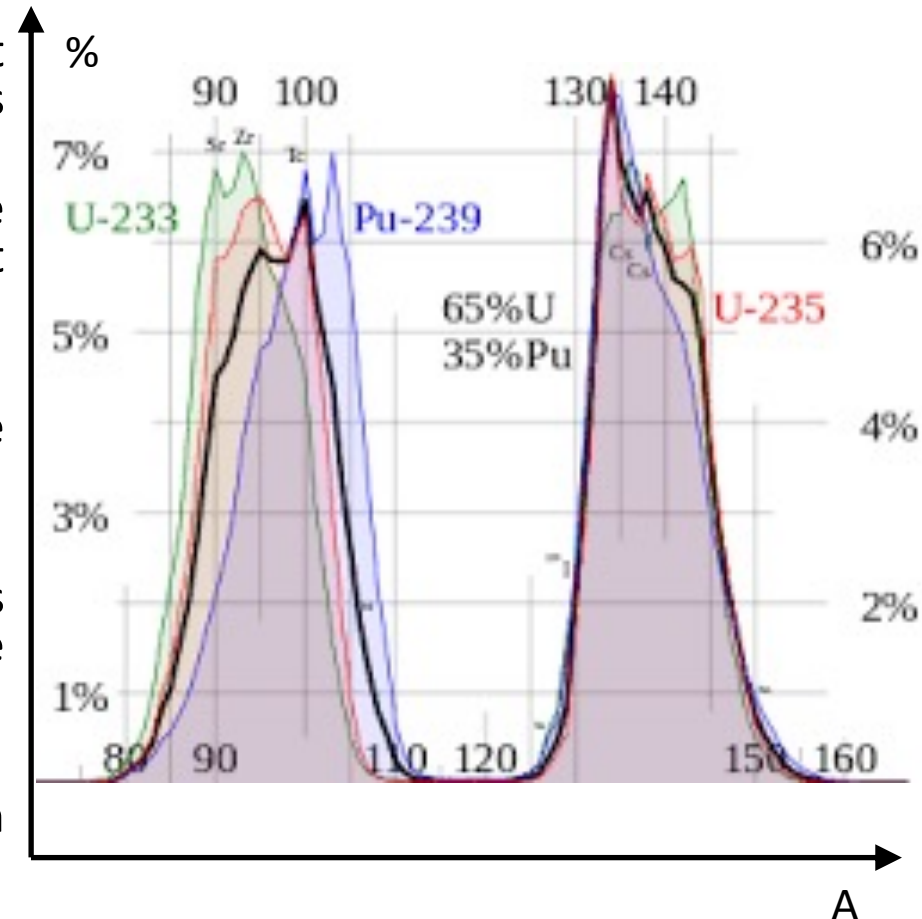
- Energie cinétique des fragments de fission $\sim 170 \text{ MeV}$
(Désexcitation des fragments de fission)
- Energie de désexcitation β $\sim 5 \text{ MeV}$
- Energie de désexcitation γ $\sim 5 \text{ MeV}$
- Energie cinétique des neutrinos $\sim 11 \text{ MeV}$
- Energie des γ prompts $\sim 6 \text{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



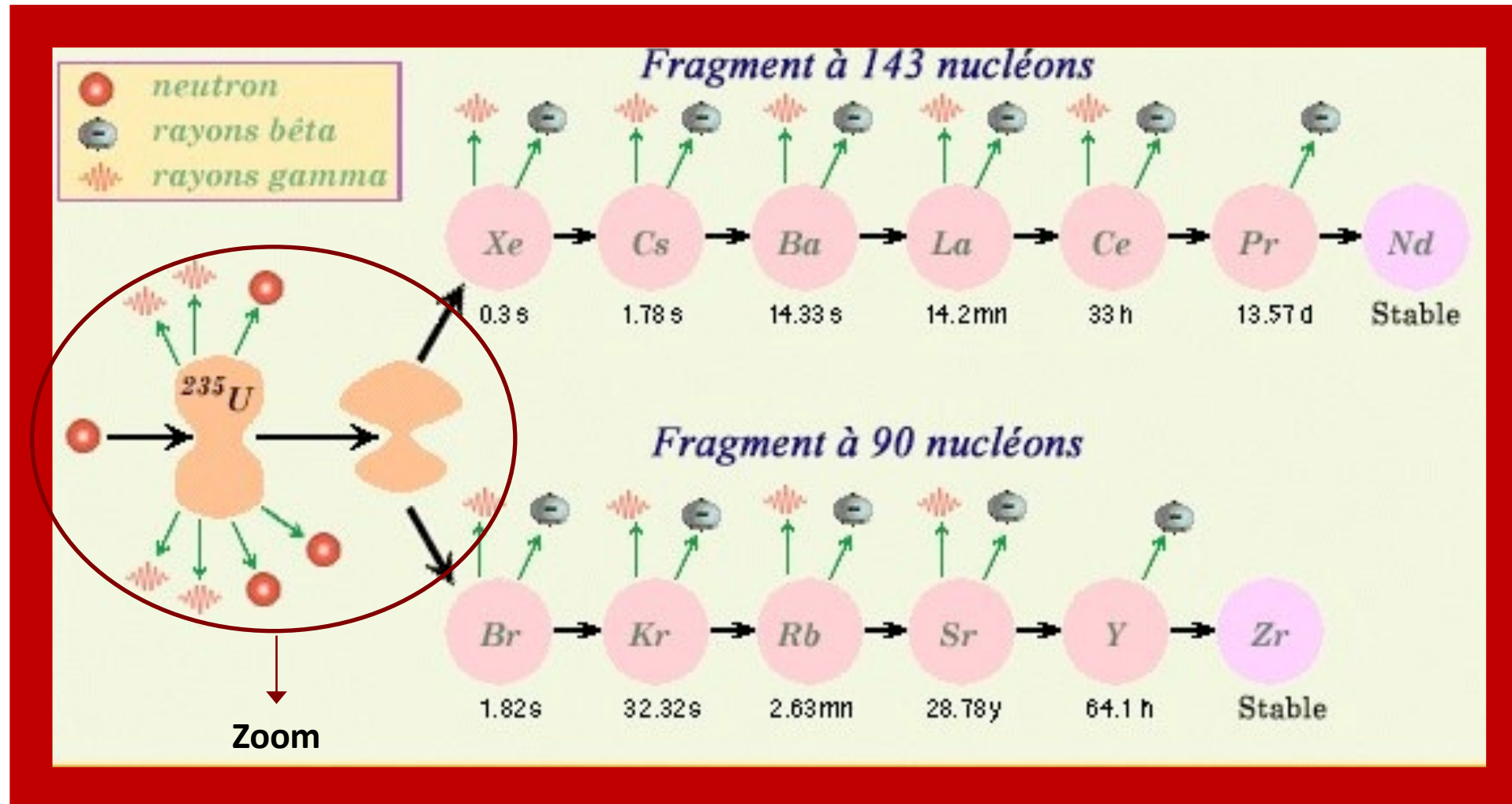
- Seule l'énergie des neutrinos sera perdue pour le bilan énergétique.
- L'énergie cinétique des fragments de fission sera immédiatement transformée en chaleur; l'énergie cinétique des neutrons et des γ prompts sera très rapidement également transformée en chaleur.
- Seule l'énergie de désexcitation des fragments de fission (β et γ) sera relâchée progressivement suivant leur période de désexcitation (quelques heures). C'est la puissance résiduelle ($\sim 7\%$ de P_{nom} à l'arrêt).

Les fragments de fission

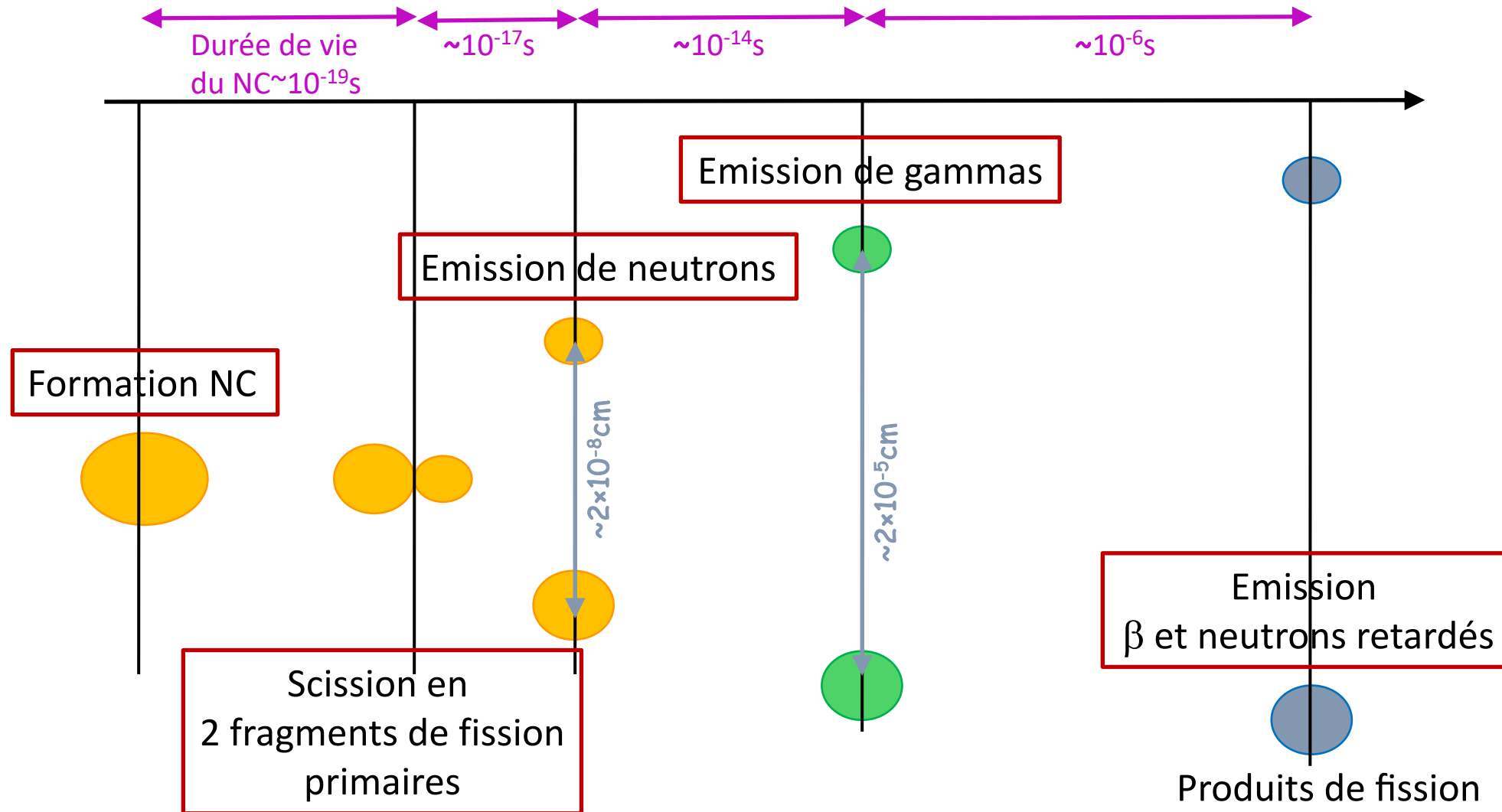
- ❑ Les fragments de fission produits sont riches en neutrons. Ils seront donc émetteurs β^- .
- ❑ La distribution en masse des fragments F1 et F2 est généralement asymétrique, mais elle peut être également symétrique (fréquent à très haute énergie).
- ❑ En général, les deux fragments ont des énergies 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

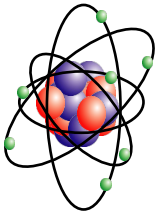
- Lorsque l'on choisit un combustible nucléaire, il faut prendre en compte en particulier :
- L'énergie émise lors d'une fission,
 - L'énergie moyenne des neutrons émis,
 - Le nombre de neutrons émis lors d'une fission...

	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

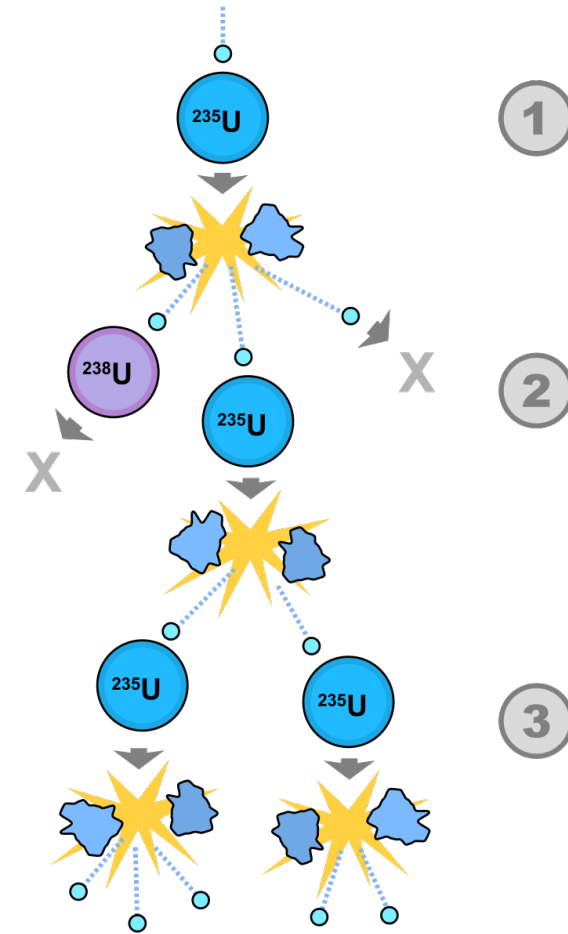


1,5 t de charbon



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)

Puissance: définitions

- ❑ La **puissance thermique du réacteur** : quantité d'énergie fournie par unité de temps par le cœur du réacteur.
- ❑ La **puissance électrique fournie par le réacteur** : quantité d'énergie produite par unité de temps par l'alternateur. C'est le produit de la puissance thermique par le rendement thermodynamique de l'installation ($\sim 0,33$ pour un REP).
- ❑ La **puissance électrique nette** : puissance électrique fournie sur le réseau, elle correspond à la puissance électrique de l'installation diminuée de la consommation électrique des divers composants de l'installation.
- ❑ La puissance du réacteur est liée au taux de fission:

$$P_{th} = E_{fission} \times \text{taux de fission}$$

Watt Joules Nombre de fissions/s

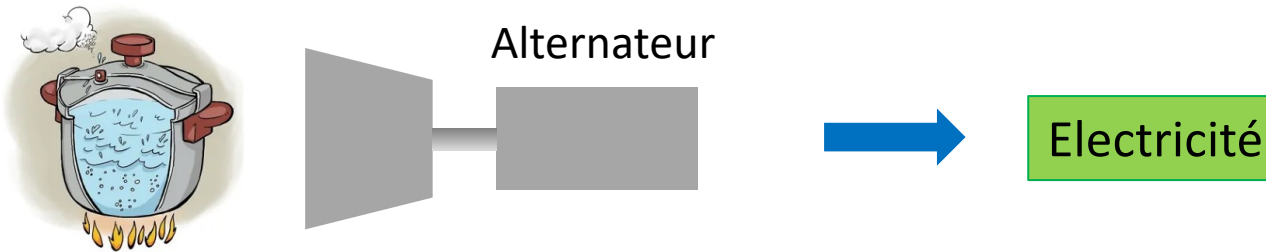
- ❑ Le **taux de combustion**: rapport de l'énergie récupérable fournie par le combustible à la masse initiale des noyaux lourds (uranium, plutonium), exprimé en Mégawatt-jour par tonne.



Base de physique neutronique

Qu'est-ce qu'un réacteur nucléaire?

- C'est une cocotte-minute!
- De la vapeur d'eau est créée par la chaleur produite par la réaction de fission nucléaire.
- Cette vapeur d'eau entraîne un groupe turbo-alternateur qui produit de l'électricité.



- Dans le cœur d'un réacteur nucléaire : une réaction en chaîne de fission est entretenue.
- Une filière de réacteur est définie par le triptyque combustible-modérateur-caloporteur caractérisant un choix scientifique et technique de production de chaleur.
- Filière des réacteurs « à eau pressurisée »: le combustible est un oxyde d'uranium enrichi autour de 3,5 % en uranium-235 tandis que le modérateur et le caloporteur sont de l'eau ordinaire.

La réaction en chaîne

- Principe réaction en chaîne: les neutrons émis lors d'une fission engendrent les fissions suivantes.

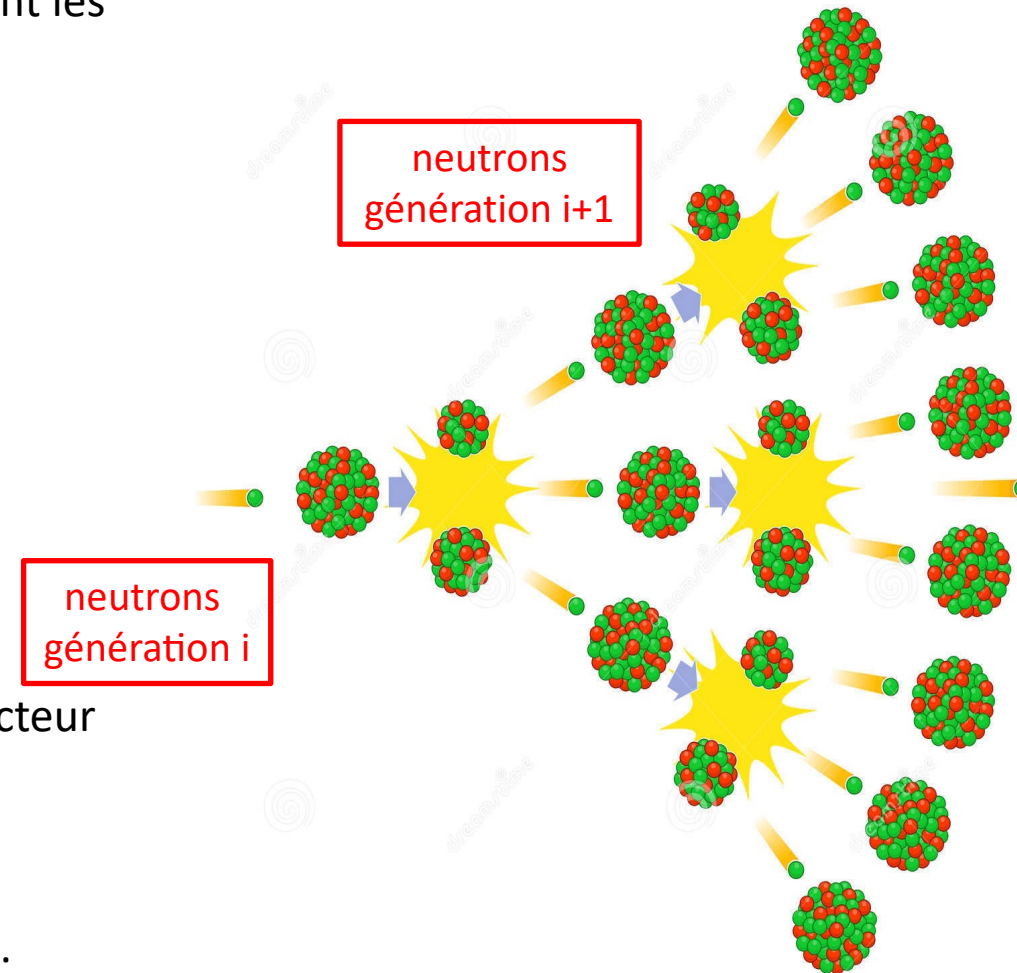
N fissions \rightarrow Nk fissions \rightarrow Nk^2 fissions \rightarrow Nk^3 fissions \rightarrow ...

- k = coefficient de multiplication :

$$k = \frac{\text{nbre neutrons génération } i + 1}{\text{nbre neutrons génération } i} = \frac{N_{\text{fissions}}(i + 1)}{N_{\text{fissions}}(i)}$$

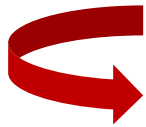
- Le comportement de la réaction en chaîne va dépendre de la valeur du facteur de multiplication k :

- si $k > 1$ la réaction s'emballe, le système est sur-critique;
- si $k < 1$ la réaction s'étouffe, le système est sous-critique;
- si $k = 1$ la réaction s'auto-entretient, le système est critique;



La réactivité ρ

□ La réactivité est souvent utilisée à la place de k_{eff} :



$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}}$$

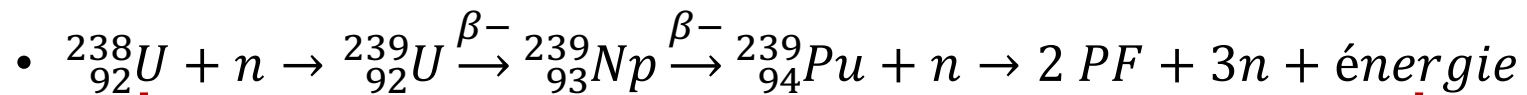
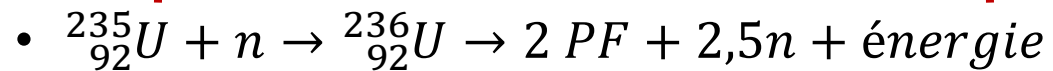
Unité: le pcm = 10^{-5}

- Si $k_{\text{eff}}=1$, $\rho=0$: on parle de réacteur critique,
- Si $k_{\text{eff}}<1$, $\rho<0$: on parle de réacteur sous-critique,
- Si $k_{\text{eff}}>1$, $\rho>0$: on parle de réacteur sur-critique,

Les fissions possibles dans un réacteur à eau légère

☐ Deux réactions essentielles :

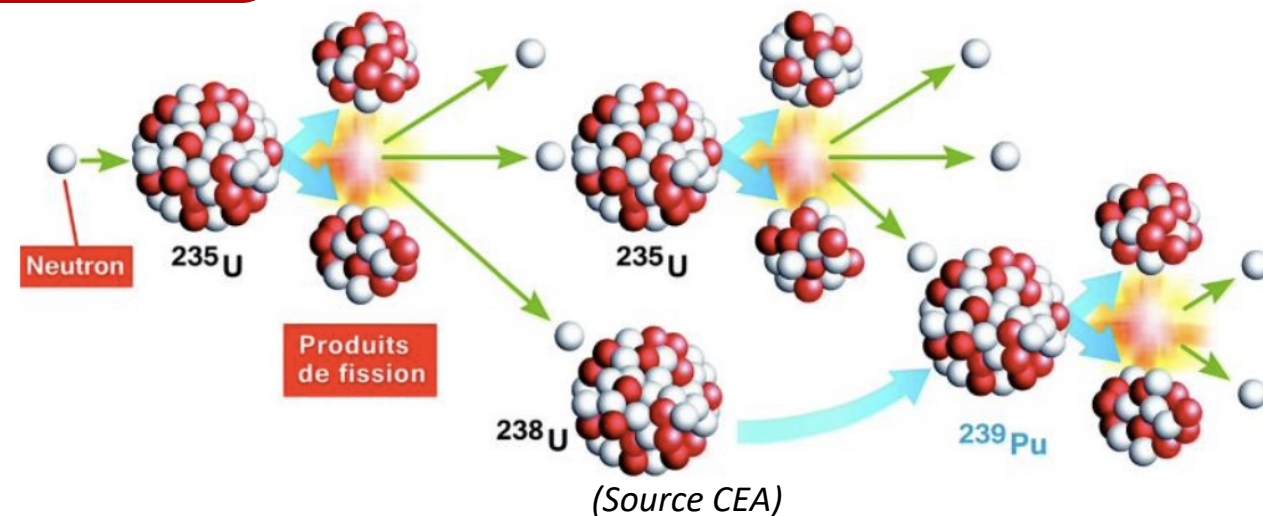
instantané



2-3 jours

☐ Fission du Pu-239 :

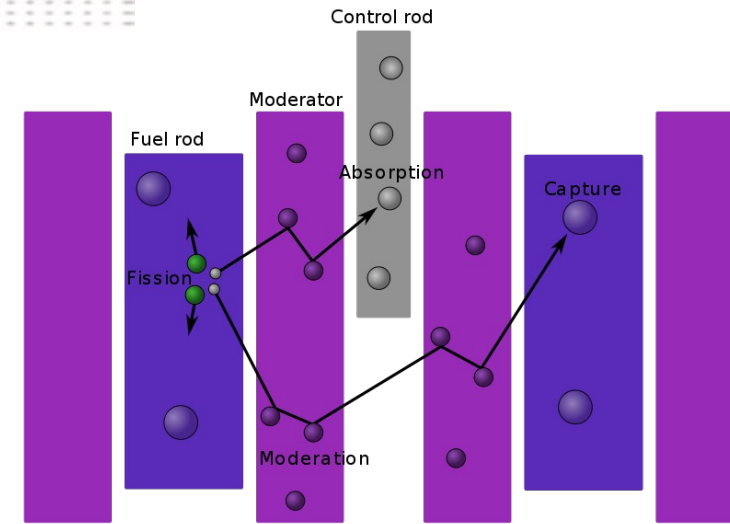
→ 30% de l'énergie produite dans un réacteur.



Dans un réacteur

- ❑ Puissance du réacteur % nbre fissions % nbre de neutrons.
- ❑ Dimensionnement d'un réacteur : maximiser le nombre de fissions et évacuer la chaleur produite
 - Besoin d'un modérateur : ralentir les neutrons sans les absorber, pour avoir le maximum de fissions.
 - Besoin d'un caloporteur : évacuer la chaleur vers le cycle à vapeur.
 - Besoin d'un nombre stable de neutrons : bilan des créations et des pertes de neutrons.
- ❑ Devenir d'un neutron dans un cœur de réacteur :
 1. Fuite du neutron hors du système;
 2. Capture stérile par l'uranium 235 ou 238;
 3. Capture stérile par le modérateur ou par les poisons;
 4. Absorption des neutrons lents par l'uranium 235 ou des neutrons rapides par l'uranium 235 et 238.
- ❑ Piloter un réacteur : vérifier que la réaction en chaîne est stable dans le temps quelque que soit les conditions.

$$1+2+3 \cong 4$$



k_{∞} et k_{eff}

Le facteur de multiplication peut être défini :

- en faisant abstraction des fuites (système infini):

➔ Facteur de multiplication infini, k_{∞}

- en tenant compte des fuites de neutrons hors du réacteur :

➔ Facteur de multiplication effectif, k_{eff}

k_{eff} et k_{∞} sont reliés par l'expression :

➔
$$k_{\text{eff}} = k_{\infty} \times (1 - P)$$

Probabilité de fuite
hors du réacteur

La probabilité de fuite
hors du système dépend
du rapport surface/volume ($1/L$)

Si $V_{\text{coeur}} \rightarrow \infty$ alors $P \rightarrow 0$

$P \searrow$ quand $V_{\text{coeur}} \nearrow$

Dans un réacteur il faut maintenir $k_{\text{eff}} = 1$ pour
créer un niveau de puissance stationnaire.

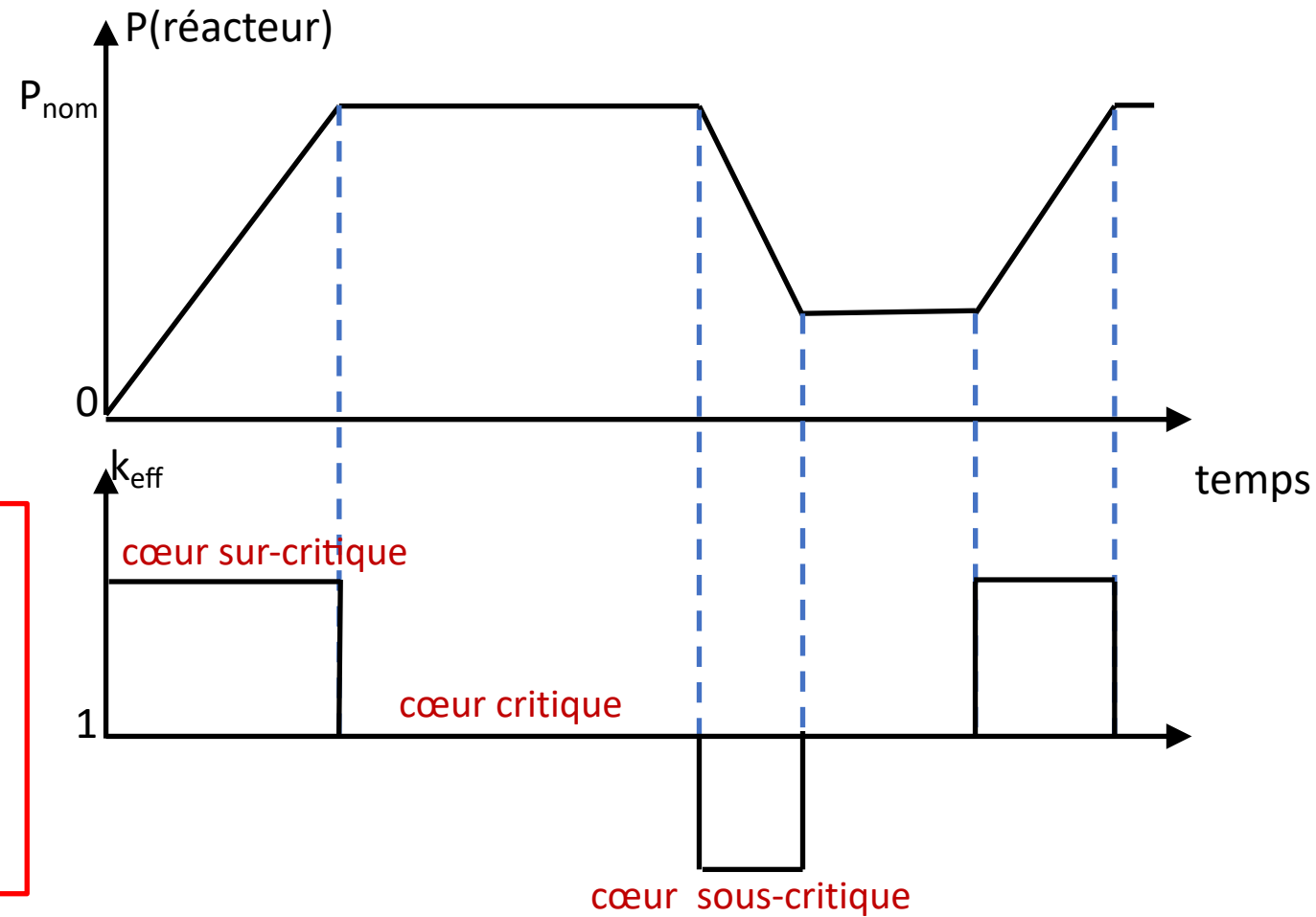
Réacteur critique

Volume % population neutrons
Surface % fuites de neutrons

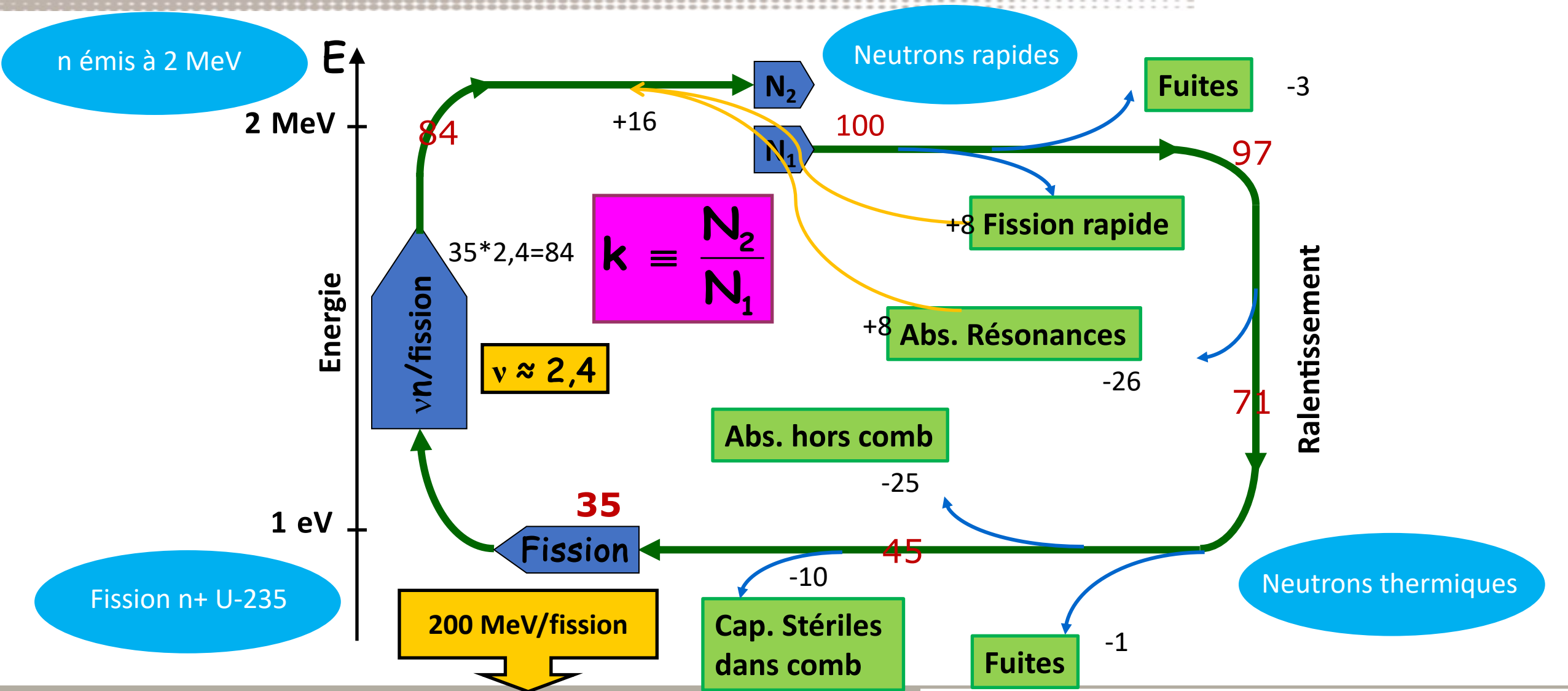
Masse de matière fissile qui correspond au système critique = masse critique

Système critique : $k=1$, dépend de:

- population neutrons et nombre de fission stables
- taille et agencement du réacteur qui permet d'optimiser le rapport surface/volume
- choix de tryptique combustible/caloporteur/modérateur

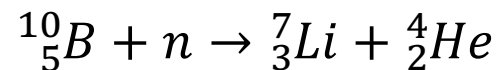


Le cycle « comptable »



Les moyens des opérateurs

- ❑ Le contrôle de la réaction en chaîne est effectué 24h sur 24h par des équipes d'opérateurs extrêmement bien formés.
- ❑ Ils se basent sur des milliers de capteurs de tout type (pression, température, flux de neutrons...) situés dans tout le bâtiment réacteur.
- ❑ Pour maîtriser la réactivité (on dit maîtriser la réactivité), l'opérateur dispose différents moyens:
 - Faire varier la concentration en bore dans l'eau du circuit primaire (car le bore absorbe les neutrons):



- Les grappes de contrôle qui s'insèrent ou s'extraient du cœur rapidement ou lentement.



Les barres de commande

❑ Les barres (grappes) de commande :

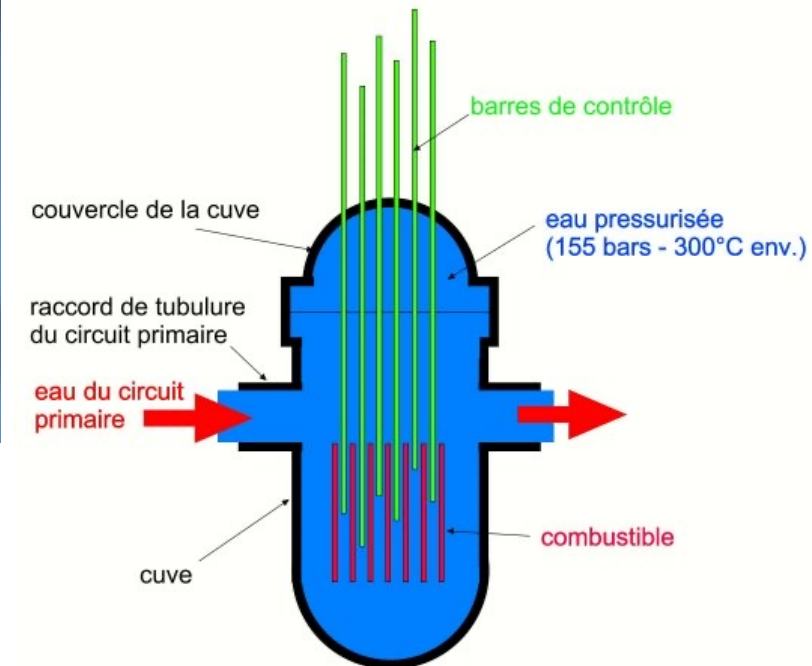
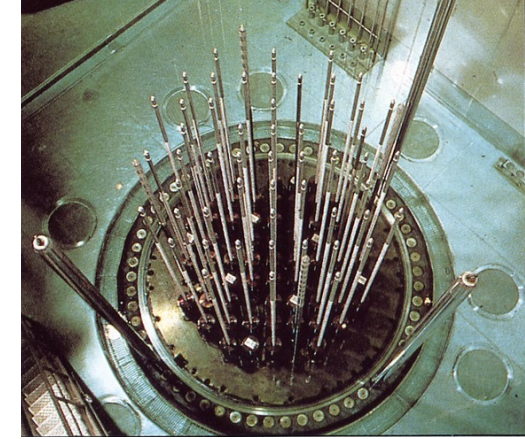
- utilisées pour les fonctions de sûreté (arrêt automatique du réacteur) et de pilotage,
- parfois partiellement ou totalement pour la fonction de compensation (compenser l'appauvrissement du combustible).

❑ Elles permettent une variation rapide de la réactivité :

- absorbants mobiles commandé depuis la salle de commande
- barres cylindriques, croix, plaques...
- mélange de noyaux absorbants: bore, cadmium, hafnium...
- nombre lié à la puissance du réacteur

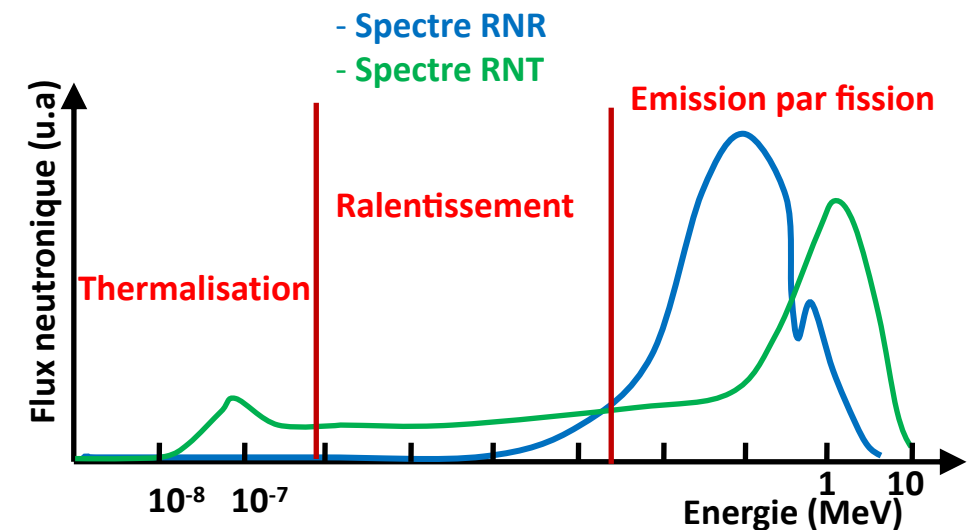
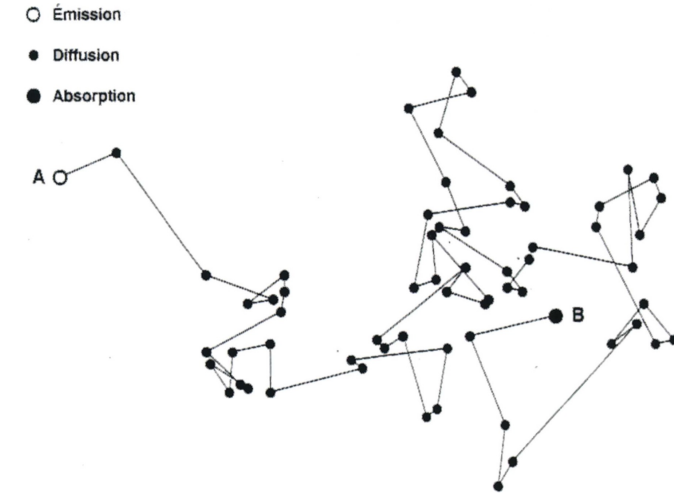
❑ Le dispositif d'arrêt d'urgence du réacteur ((AAR) est automatique :

- en cas de dépassement des certaines valeurs.
- en cas de situations non conformes.



Le ralentissement des neutrons

- Caractéristique de la population neutronique :
 - Importante : $\sim 10^8$ n/cm³ mais moins que les atomes du cœur.
 - La population de neutrons dans un cœur est traitée de manière statistique, par la notion de densité.
- Réaction la plus efficace pour ralentir les neutrons:
 - La diffusion des neutrons sur les noyaux légers .
- L'histoire des neutrons est divisée en trois grandes étapes :
 1. la première étape: immédiatement après l'émission par fission à une énergie moyenne de 2 MeV et suffisamment énergétiques pour provoquer quelques fissions de l'uranium 238.
 2. Seconde étape: ralentissement pendant lequel les neutrons risquent de disparaître dans les « trappes » que représentent les résonances de l'uranium 238.
 3. Troisième étape: étape thermique où les neutrons ont une énergie de 0,025 eV où ils finissent par disparaître par absorption.

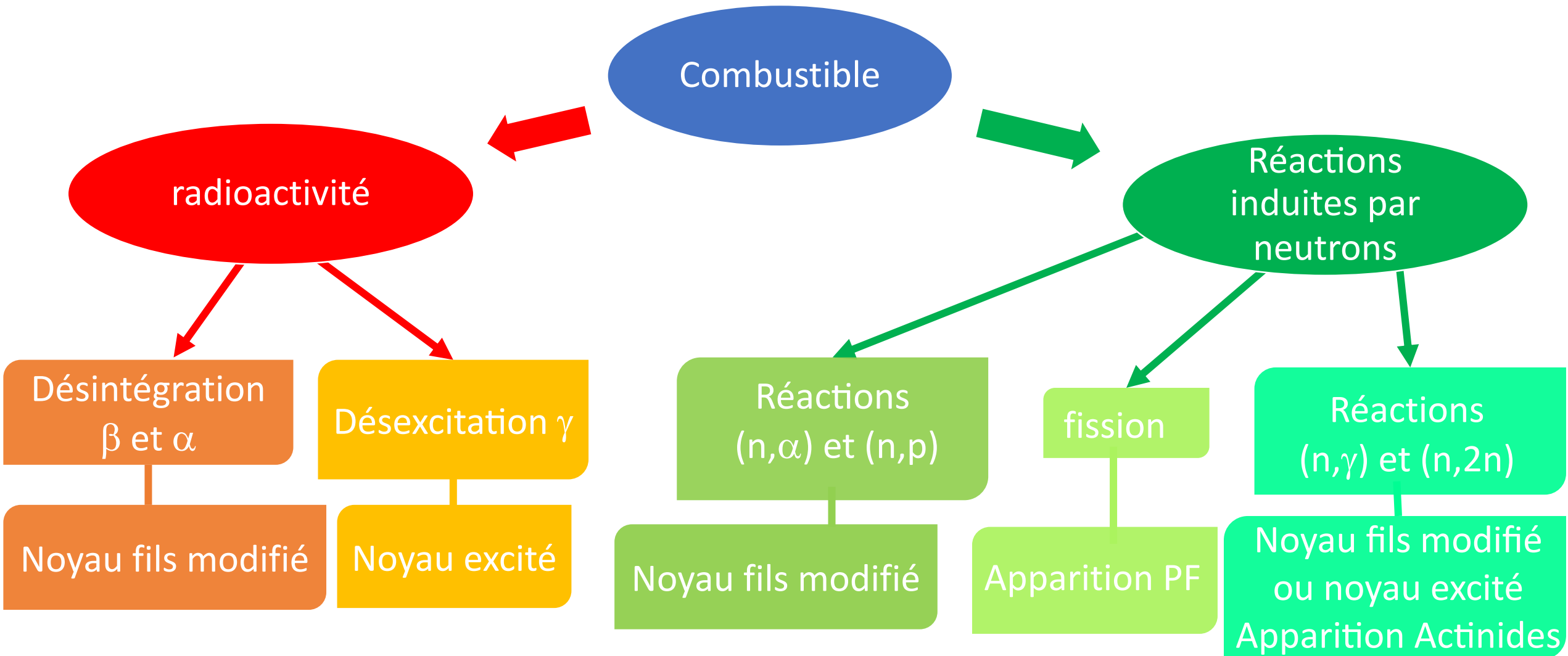




Evolution du combustible



Evolution du combustible



Exemple uranium-235

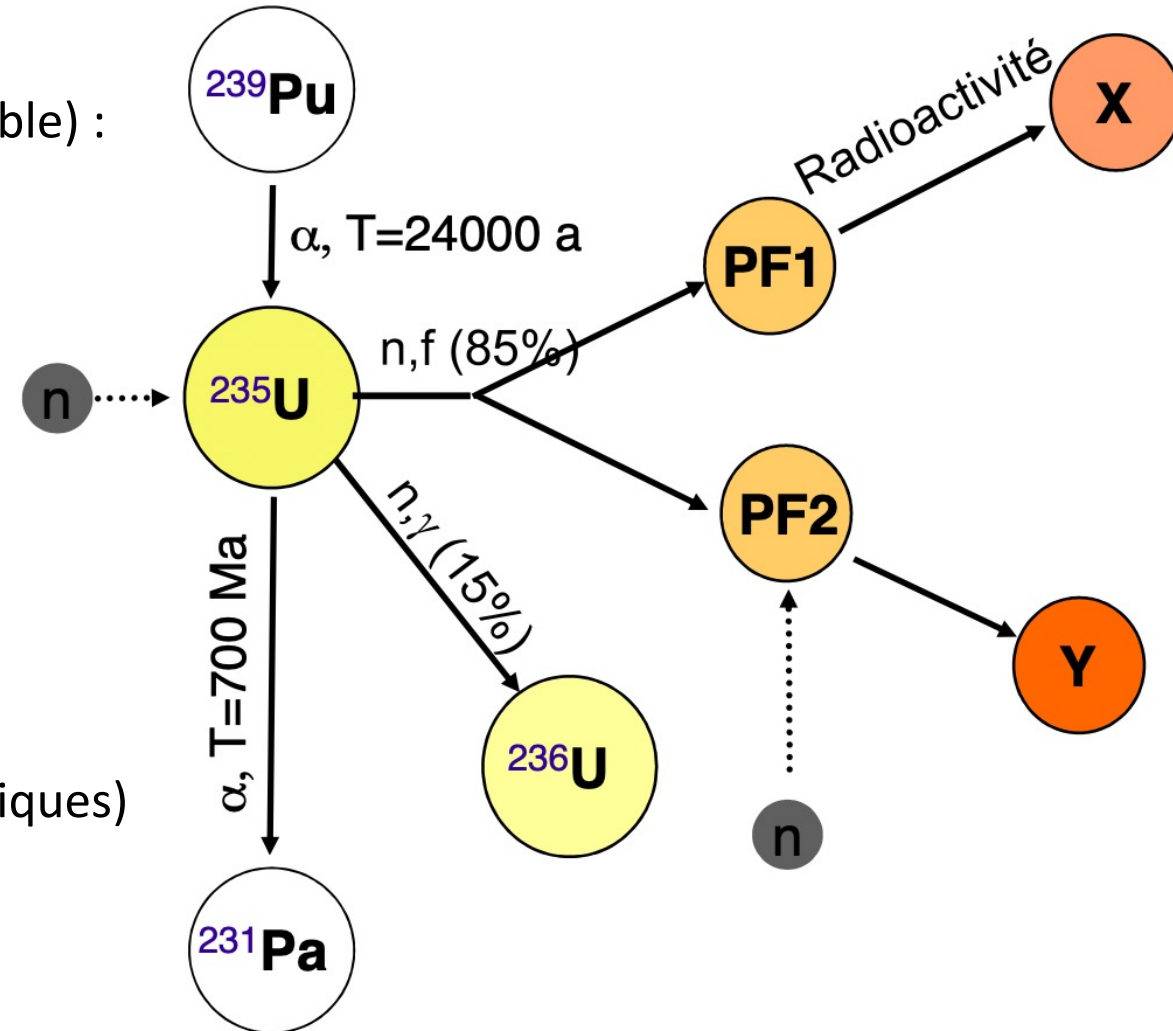
❑ Caractéristiques des noyaux créés (vrai pour tout combustible) :

1. Produits de fission :

- Déchets radioactifs : $T_{1/2}$ longues
- absorbants neutroniques : (^{135}Xe , ^{149}Sm) : poisons

2. Nouveaux noyaux lourds créés :

- Fissiles : ^{239}Pu , ^{241}Pu
- Noyaux excités et absorbants neutroniques : ^{236}U
- Actinides mineurs : Np, Am, Cm (déchets+abs. neutroniques)



Les équations de Bateman

Calcul des concentrations de chaque noyau permet :

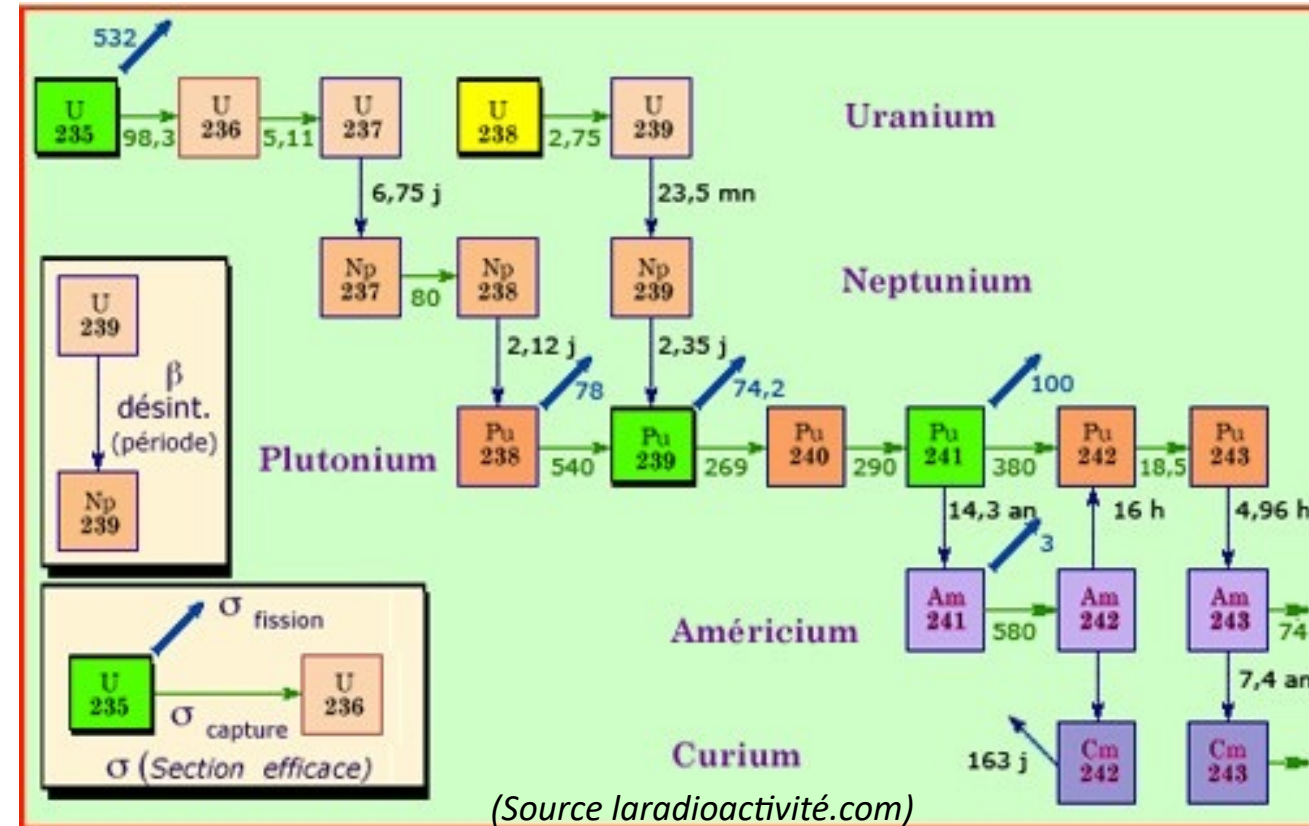
- Calculer le bilan neutronique (évolution de ρ).
- Prédire la production de déchets + matières fissiles.
- Estimer la dose due à la radioactivité du combustible.

Deux chaînes possibles pour produire de l'énergie :

- Chaîne de l'uranium (^{235}U fissile, ^{238}U fertile)
- Chaîne du thorium (^{233}U fissile, ^{232}Th fertile)

La concentration $N_i(t)$ d'un noyau i évolue :

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = \text{production} - \text{disparition}$$



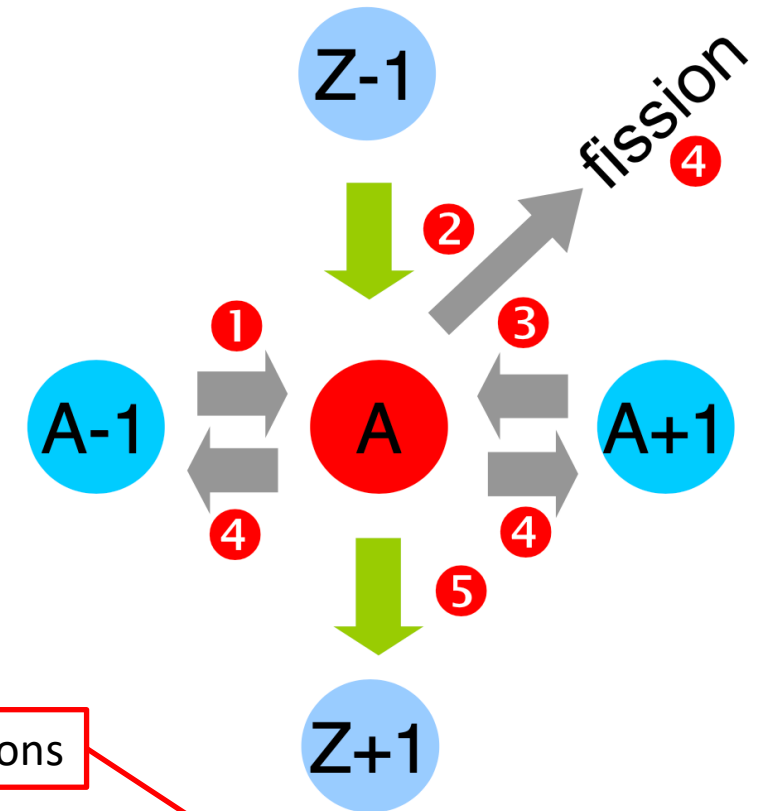
Suite...

 Production du noyau i :

- Capture d'un neutron par le noyau de masse A-1 1
- Décroissance radioactive du noyau (A, Z-1) 2
- Réaction (n,2n) sur le noyau de masse A+1 3

 Disparition du noyau i :

- Absorption d'un neutron par le noyau i (capture, fission, (n,2n)) 4
- Décroissance radioactive du noyau i 5



$$\frac{dN_i(A, Z)}{dt} = \sigma_{c,j} N_j(A-1, Z) \phi + \lambda_k N_k(A, Z-1) + \sigma_{c,l} N_l(A+1, Z) \phi - \sigma_{a,i} N_i(t) \phi - \lambda_i N_i(t)$$

1

2

3

4

5

Le taux de conversion

- ❑ Le taux de conversion peut être calculé grâce à la résolution des équations de Bateman.
- ❑ C'est le rapport du nombre de noyaux fissiles formés au nombre de noyaux fissiles détruits.

$$C = \frac{\text{nbre de noyaux fissiles produits}}{\text{nbre de noyaux fissiles détruits}}$$

- ❑ Ce facteur de conversion peut être calculé soit pour un temps donné (début d'irradiation par exemple), soit intégrés sur une certaine période (par exemple toute la durée de combustion).
- ❑ Le facteur de conversion C pour différentes filières de réacteurs:

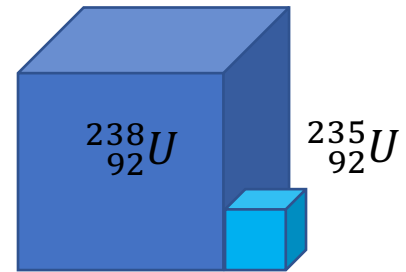
filière	UNGG	CANDU	REP	RNR	RNR+CA	RNR+CA+CR
C	0,8	0,9	0,6	0,8	1	1,2

RNR+CA : avec couvertures axiales

RNR+CA+CR : avec couvertures axiales et radiales

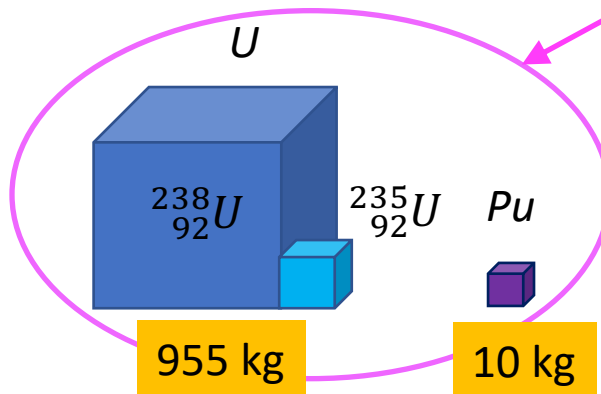
Le combustible dans un REP

1 tonne d'uranium enrichi à 3,5%
965 kg $^{238}_{92}\text{U}$ et 35 kg $^{235}_{92}\text{U}$

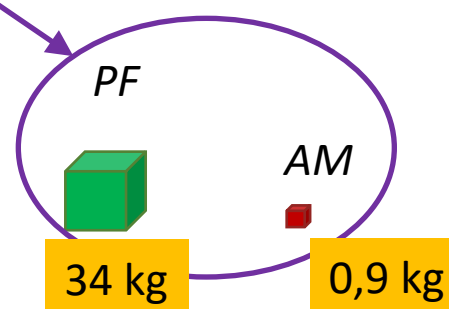


3-4 ans en réacteur

Matières valorisables



Déchets ultimes



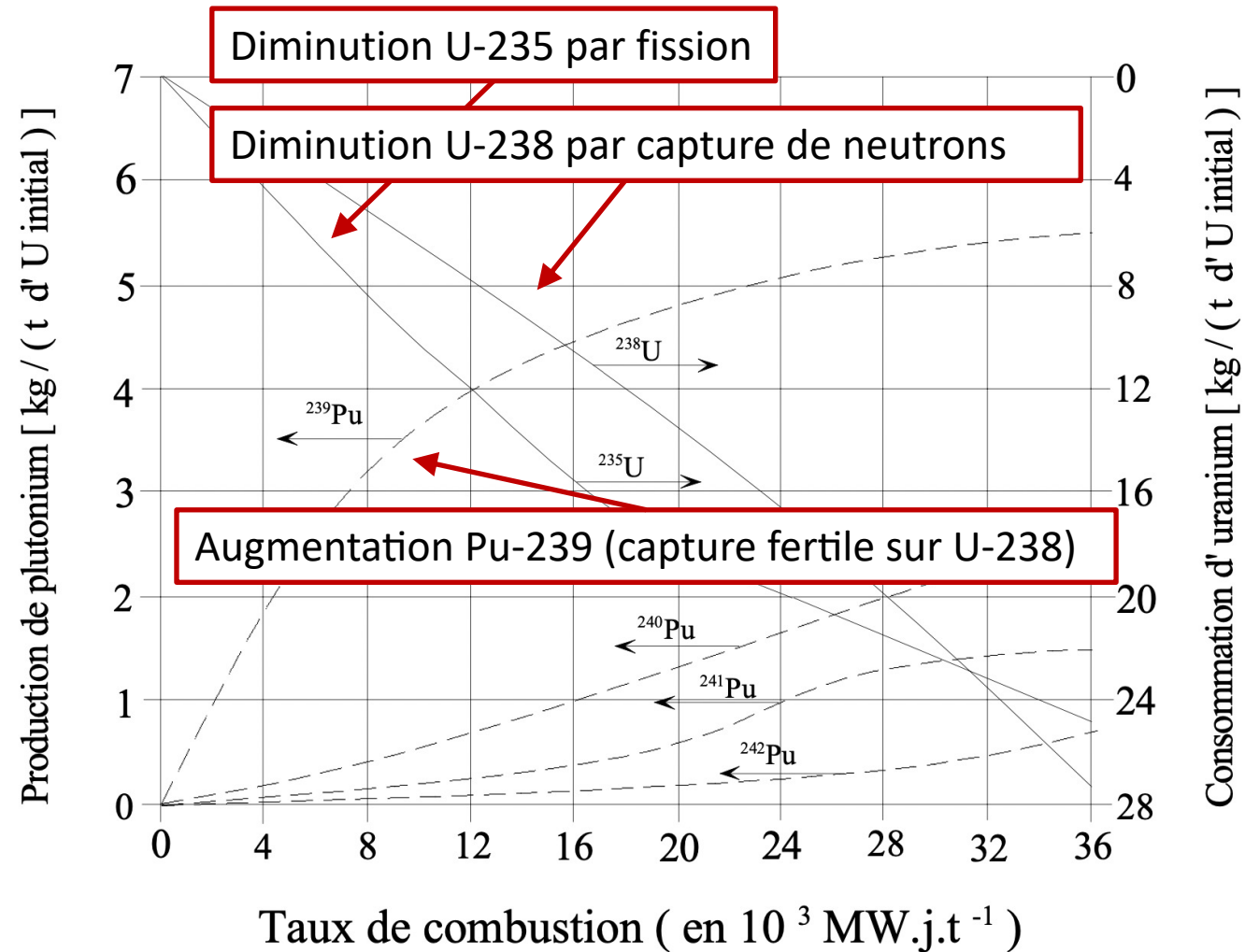
Après passage en cœur :

- 95% de l'uranium
- 1% de plutonium
- 4% PF+AM

Evolution du combustible dans un REP

- ❑ Les captures des neutrons par l'uranium-238 conduisent au plutonium-239.
- ❑ Absorption d'un n thermique par le Pu-239 :
 - Fission : $\sigma_f \sim 750$ barns.
 - Capture stérile pour produire du Pu-240 : $\sigma_c \sim 270$ barns
- ❑ Augmentation des PF dans le combustible:
- ❑ On utilise le **taux de combustion** ou burn-up:

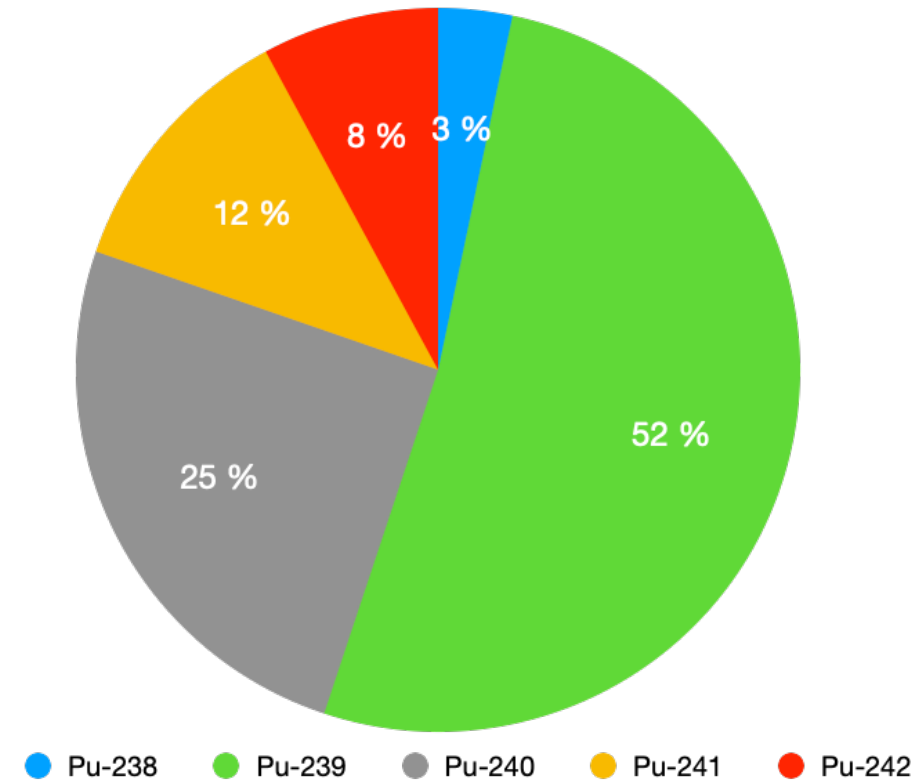
taux de combustion = énergie produite par le combustible par unité de masse initiale des noyaux lourds (uranium, plutonium), exprimé en Mégawatt-jour par tonne.



Le cas du plutonium

- ❑ Environ 10 kg de plutonium dans 1t de combustible utilisé.
- ❑ Dégradation de la qualité du plutonium sous irradiation en cœur.
- ❑ Fission favorisée que pour Pu-239 et Pu-241 en n thermiques.
- ❑ Les isotopes pairs du plutonium absorbent les neutrons.
 - **problème pour stabilité de la réaction en chaîne.**
- ❑ Environ 60% d'isotopes impairs et 40% de pairs.
 - **Le plutonium moins adapté après plusieurs cycles d'irradiation.**
- ❑ Le même résultat est visible sur le recyclage des combustible MOX.
- ❑ En n rapides, tous les isotopes du plutonium peuvent fissionner.
 - **vers des concepts de réacteurs à neutrons rapides.**

Pourcentage isotopes du plutonium combustible déchargé à 50 000 MWj/t

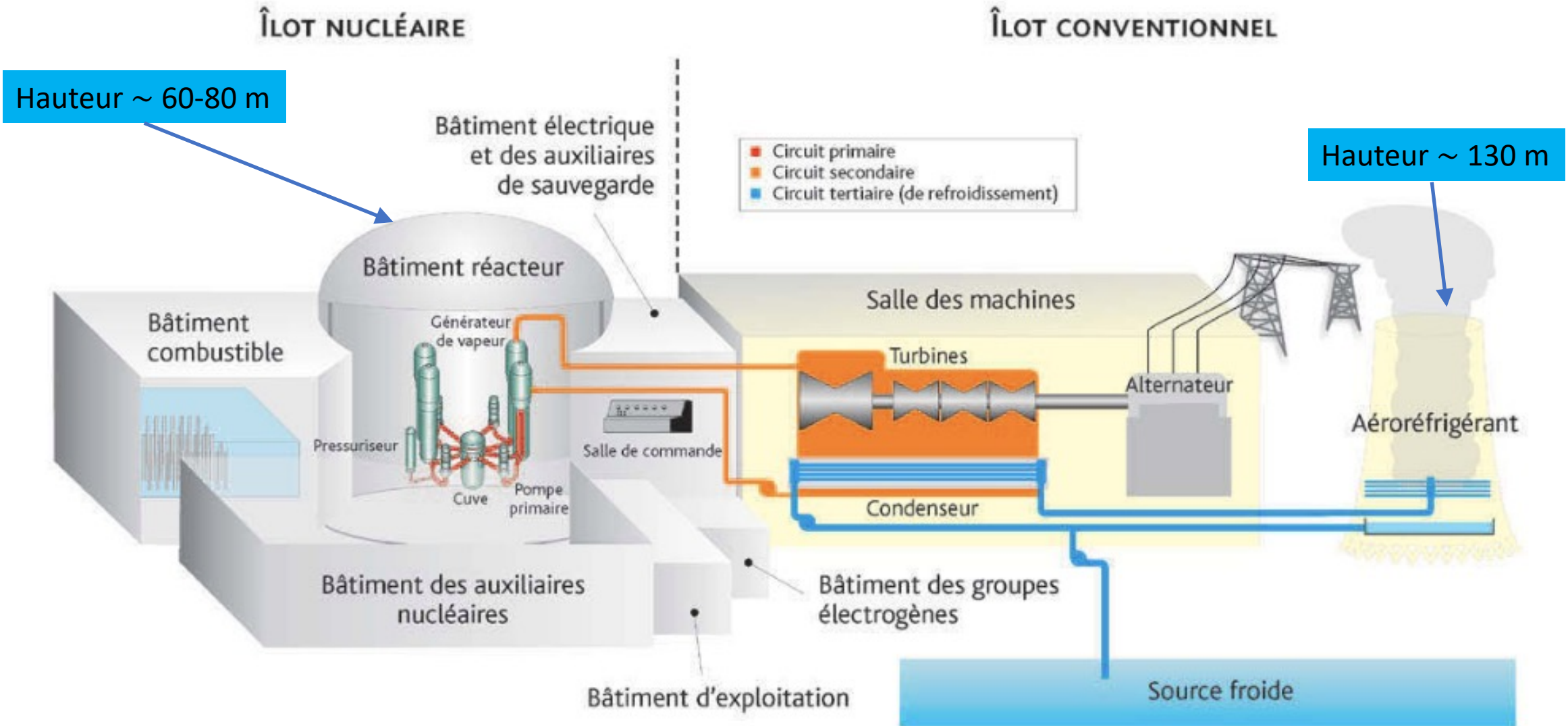


Les deux voies possibles: RNR et RNT

- ❑ La voie de l'uranium enrichi et des neutrons rapides: **les réacteurs à neutrons rapides RNR**: les neutrons sont utilisés directement lorsqu'ils sont produits par la fission.
- ❑ La voie de l'uranium peu enrichi et des neutrons thermiques: **les réacteurs à neutrons thermiques RNT**: les neutrons sont utilisés aux énergies thermiques et doivent donc être ralentis en franchissant les résonnances.
- ❑ Ces deux voies furent développées par la France la première dans Phénix et Superphénix et la seconde dans les REP actuellement en fonctionnement.
- ❑ Ces deux voies peuvent être appelées **filières de réacteurs**.
- ❑ Un cœur de réacteur est composé:
 - un combustible contenant des noyaux fissiles,
 - un fluide caloporteur permettant l'extraction de l'énergie produite par la fission,
 - pour les RNT, un modérateur contenant des noyaux légers destinés au ralentissement des neutrons,
 - des structures métalliques qui permettent la tenue mécanique de l'ensemble et la séparation des différents milieux.

□ Le réacteur nucléaire

Vue d'ensemble d'une centrale électro-nucléaire

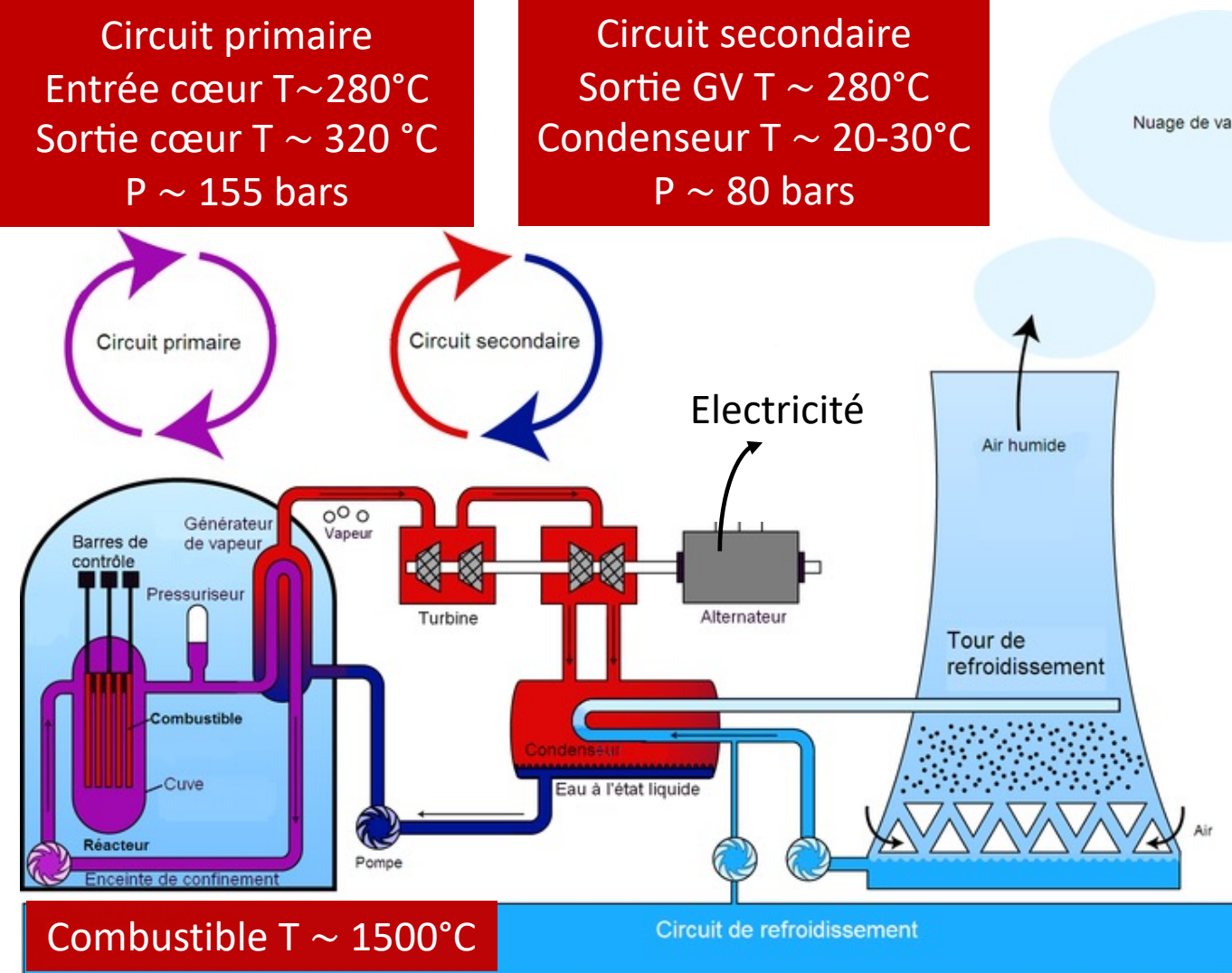


Une centrale nucléaire

Circuit primaire
 Entrée cœur $T \sim 280^\circ\text{C}$
 Sortie cœur $T \sim 320^\circ\text{C}$
 $P \sim 155$ bars

Circuit secondaire
 Sortie GV $T \sim 280^\circ\text{C}$
 Condenseur $T \sim 20\text{-}30^\circ\text{C}$
 $P \sim 80$ bars

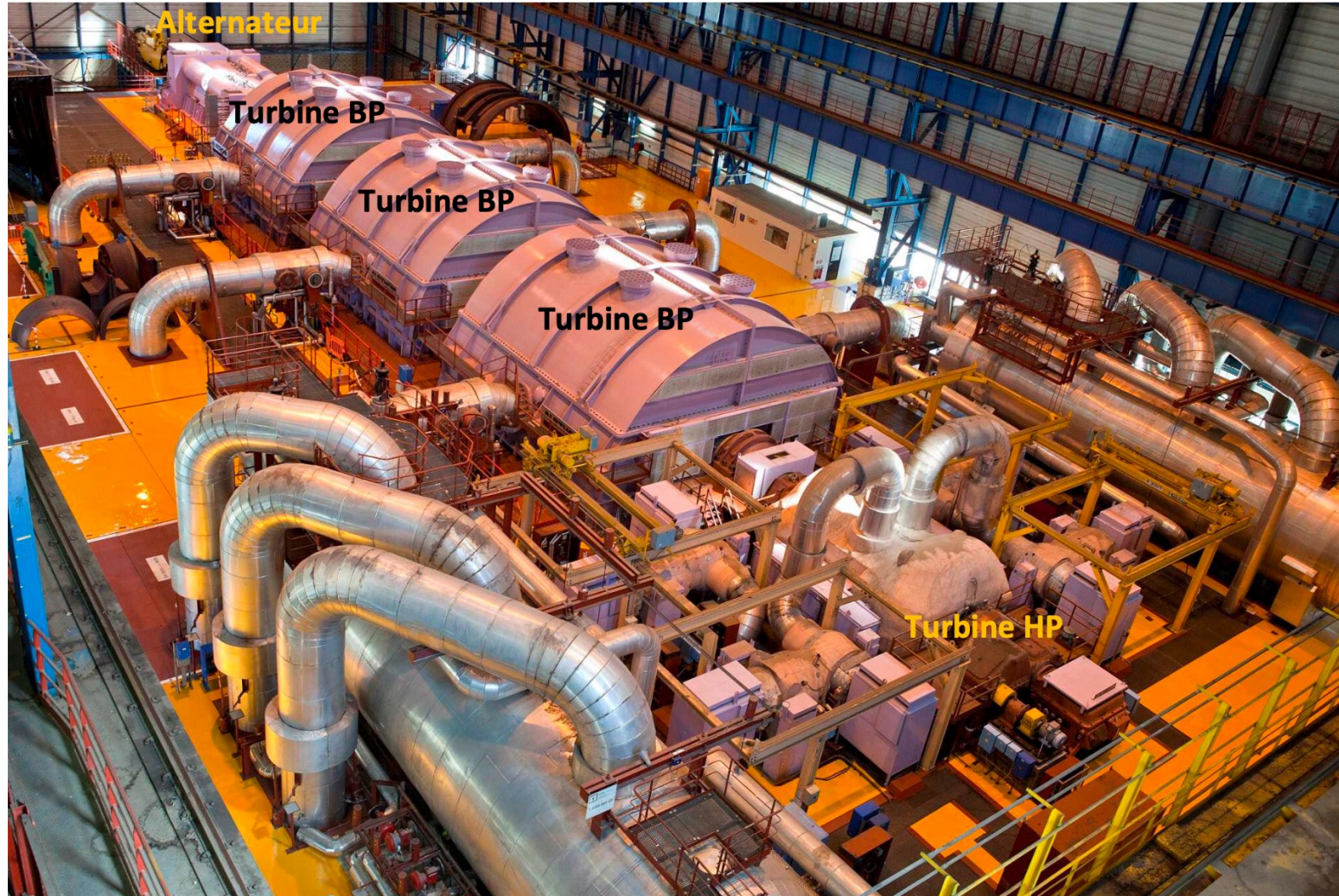
- ❑ 3 circuits indépendants
- ❑ Beaucoup d'autres systèmes :
 - Contrôle-commande et instrumentation
 - Circuits fluides (purification, borication,...)
 - Circuits électriques
 - Bâtiments (BR, BK, BAN...)
- ❑ Sûreté : 3 fonctions de sûreté
 - Stabilité de la réactivité (criticité)
 - Confinement
 - Refroidissement
- ❑ Basée sur la défense en profondeur
- ❑ 3 barrières de sûreté :
 - La gaine de combustible
 - Le circuit primaire
 - L'enceinte de confinement



Combustible $T \sim 1500^\circ\text{C}$

Circuit de refroidissement

Salle des machines



(Source J.F. Noal EDF)

Le crayon combustible

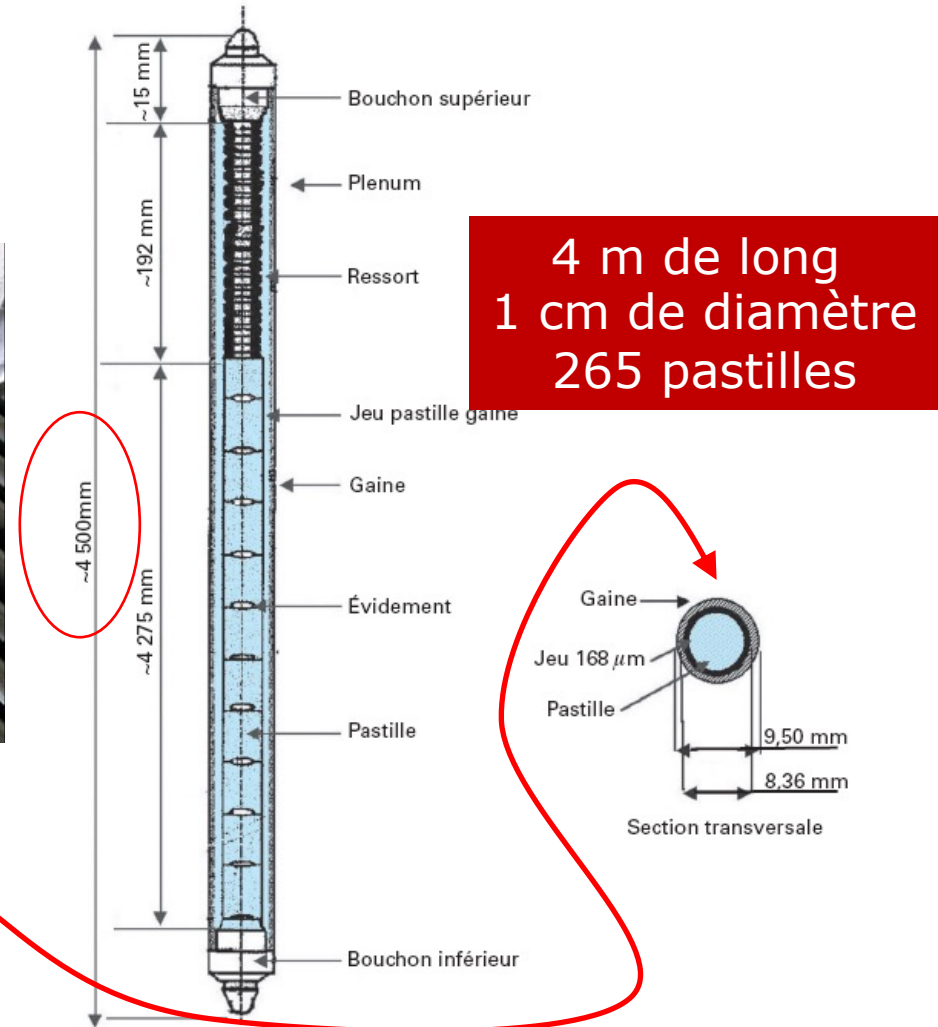


Pastille
7g, avec $h > d$
1 cm de long
1 cm de diamètre



~ 100 tonnes d'U
~ 16 millions de pastilles

1^{ère} barrière de sûreté:
gaines des éléments combustibles
en alliage de zirconium.



Assemblage combustible

- ❑ ~ 200 assemblages de 264 crayons
 - Palier 900 : 157;
 - Palier 1300 : 193;
 - Palier N4 : 205;
 - EPR : 241.

- ❑ Poids total : 607 kg – 765 kg

- ❑ Masse totale de combustible = 500 kg

- ❑ Combustible possible:
 - UNE : uranium naturel enrichi UO_2
 - MOX : mélange oxydes UO_2 et PuO_2
 - URE : uranium de retraitement enrichi UO_2 (utilisé par EDF jusqu'en 2013, possible reprise)

(Source CEA, EdF, Areva)



La cuve

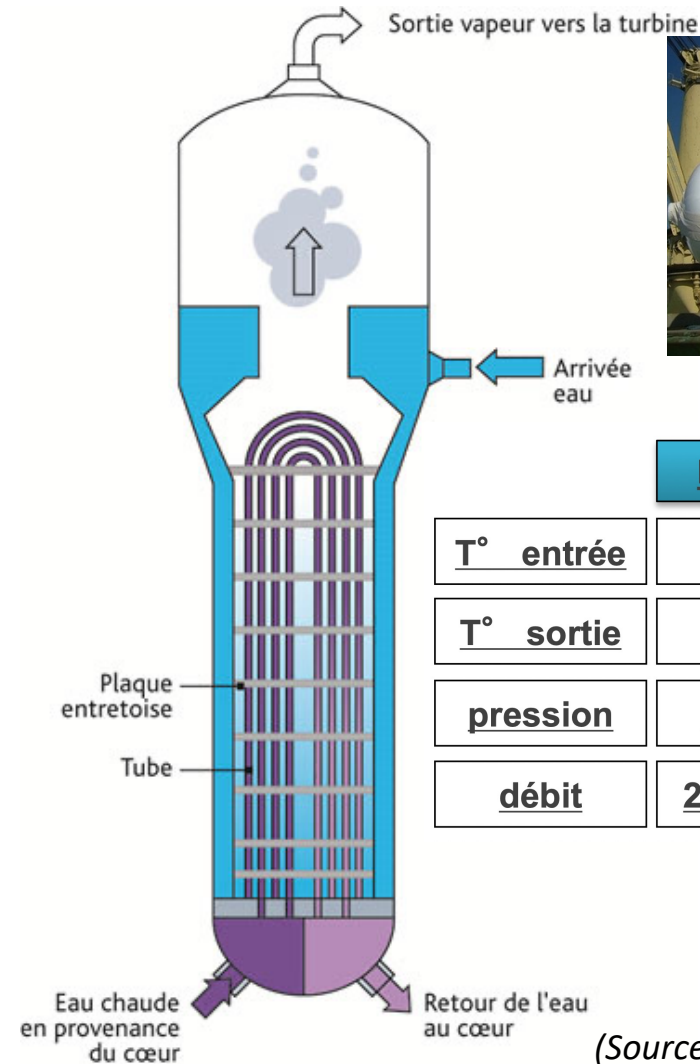
- ❑ La cuve est une enceinte en acier spécialement traité, étanche renfermant le cœur, les structure de support du cœur et les structures de guidage des grappes de contrôle.
- ❑ $H = 13,66 \text{ m}$, $D = 4,95 \text{ m}$, $e = 23 \text{ cm}$



(Source Framatome)

Le Générateur de Vapeur

- ❑ Les générateurs de vapeur (GV) = échangeurs de chaleur entre le circuit primaire et le circuit secondaire.
- ❑ Dimensions : hauteur ~ 20 m; D ~ 4 m; M ~ 400 t.
- ❑ Faisceau tubulaire = Entre 3500 et 5600 tubes à l'intérieur desquels circule l'eau du circuit primaire (à 320°C et haute pression 155 bars). Surface d'échange ~5 000 m² par GV.
- ❑ L'eau du circuit secondaire circule le long des tubes en se transformant progressivement en vapeur au contact des tubes chauffés par l'eau du circuit primaire.
- ❑ **Rôle** : Produire de la vapeur de bonne qualité pour la turbine.
- ❑ **Sûreté**:
 - Evacuer la chaleur produite par le réacteur → Refroidir le circuit primaire
 - Barrière entre le circuit primaire et le circuit secondaire.

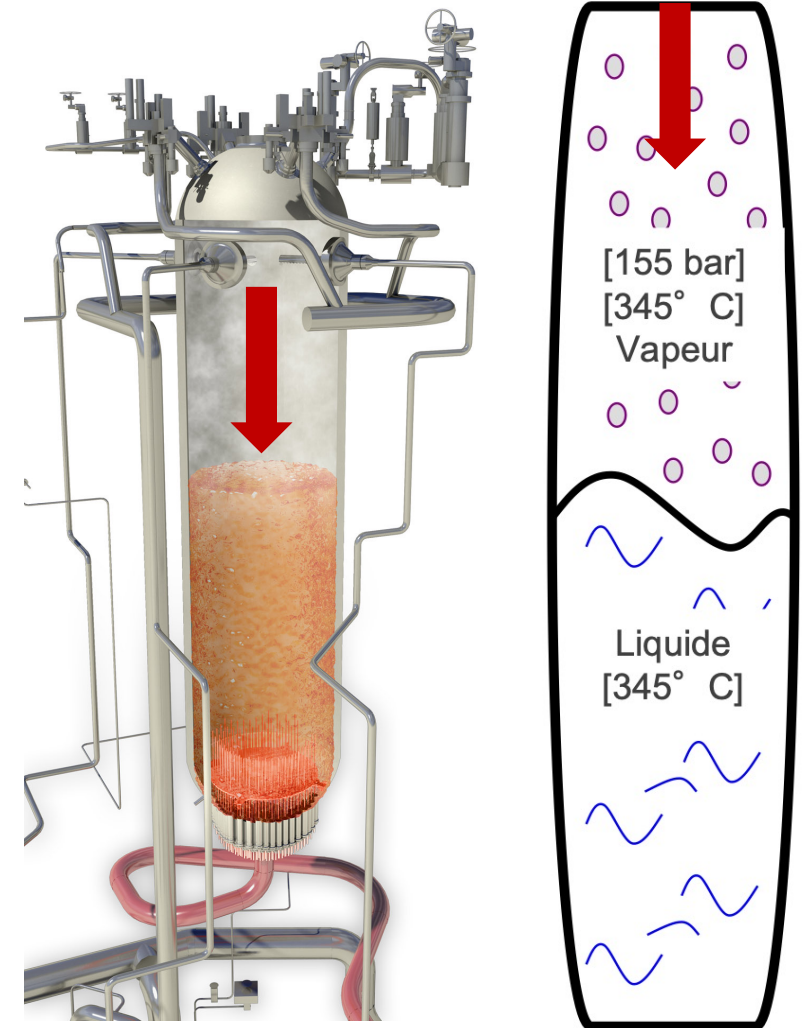


	Primaire	Secondaire
T° entrée	324° C	230° C
T° sortie	289° C	285° C
pression	155 bar	70 bar
débit	22 890 t/h	1934 t/h

(Source IRSN)

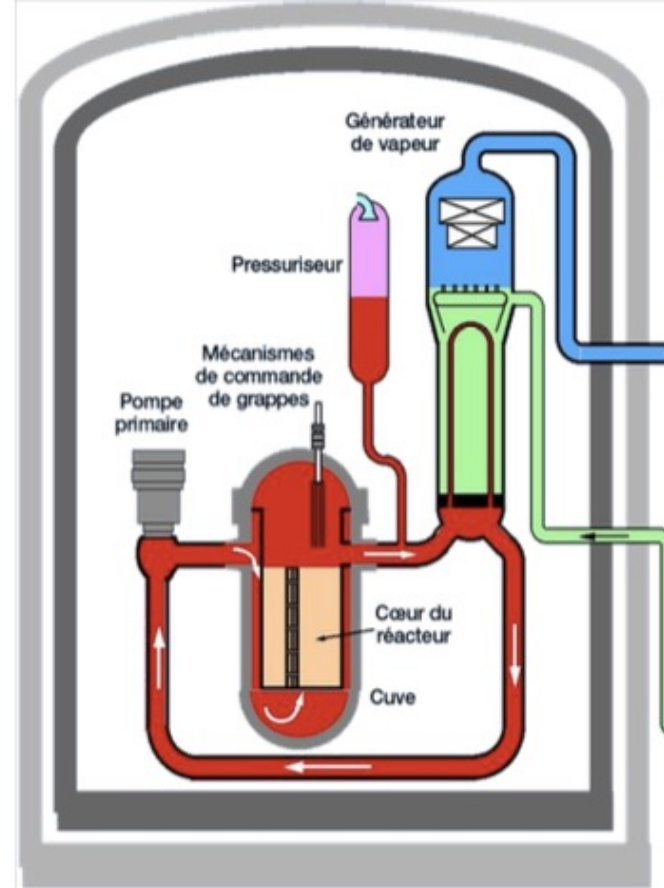
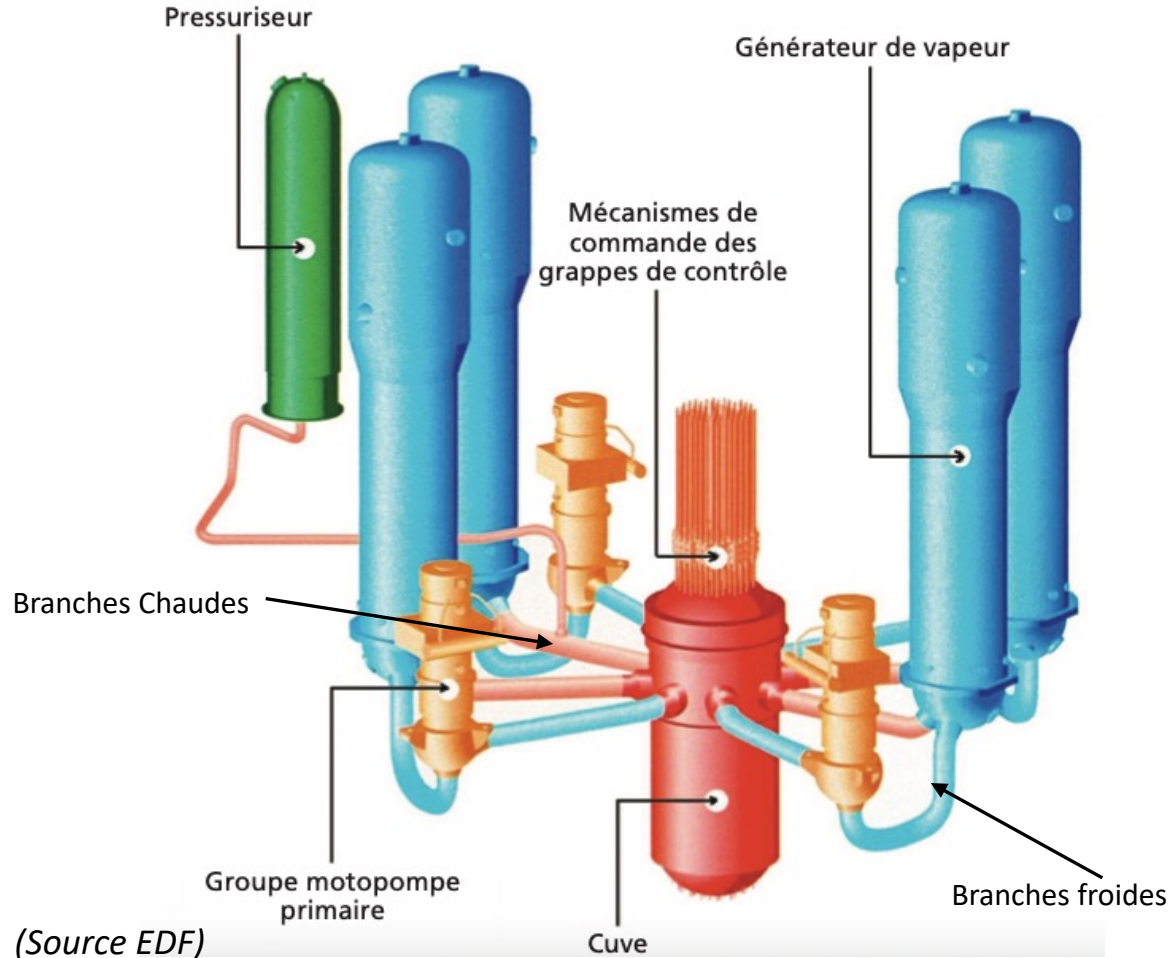
Le pressuriseur

- ❑ Le pressuriseur est un réservoir cylindrique disposé verticalement,
- ❑ Il est unique.
- ❑ $T_{\text{eau}} = 345^{\circ}\text{C}$ (= température de saturation de l'eau à 155 bars) :
→ Mélange diphasique eau/vapeur.
- ❑ Dimensions hauteur ~ 13 m, $D \sim 2,5-3$ m, $V \sim 40$ m³- 60 m³.
- ❑ Rôle :
 - contrôler la pression du circuit primaire à 155 bars, (Eau du circuit primaire doit toujours être à l'état liquide)
 - Absorber les variations de volume,
 - Protéger le circuit primaire des surpressions :
→ Maintient l'intégrité de la 2ème barrière



(Source EDF)

Circuit primaire REP



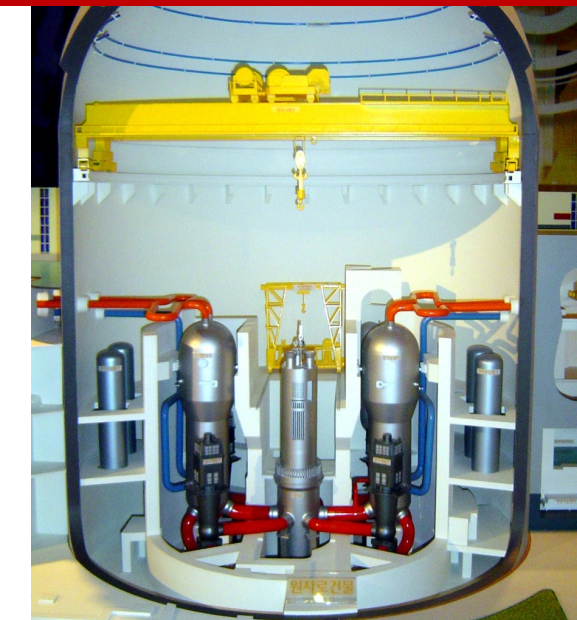
2^{ème} barrière de sûreté :
le circuit primaire principal (CPP)

Enceinte de confinement

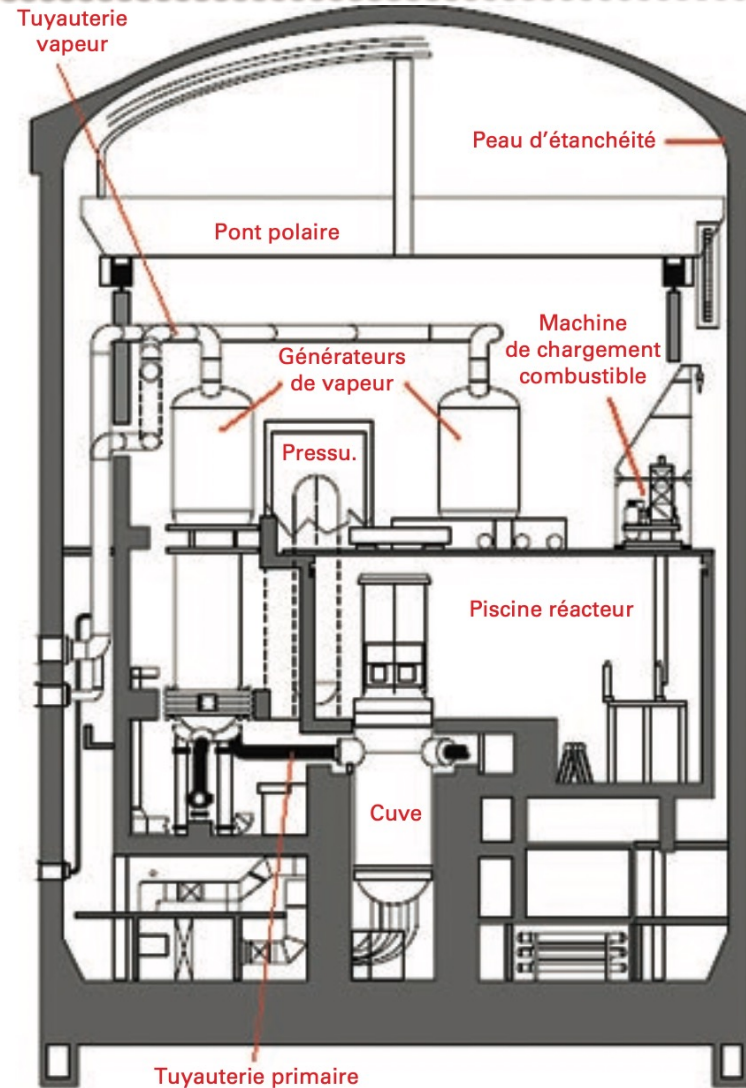
- ❑ Bâtiment cylindrique en béton (précontraint, armé), surmonté d'un dôme.
- ❑ Fonction de résister aux accidents (origine interne) aussi bien qu'aux agressions externes.
- ❑ 900 MWe, paroi unique en béton précontraint :
 - $D=37\text{m}$; $H=60\text{m}$ $e=90\text{cm}$; épaisseur dôme= 80cm ; peau métallique de 6 cm .
- ❑ 1300, 1450 MWe : double paroi
 - Paroi interne en béton précontraint : $e=120\text{ cm}$ pour le cylindre et $e=82\text{ cm}$ pour le dôme. Fonction = résister aux conditions de pression et de température internes en assurant une "relative" étanchéité.
 - Paroi externe en béton armé : $e=55\text{ cm}$ pour le cylindre et $e=40\text{ cm}$ pour le dôme. Elle a pour fonction de créer l'espace annulaire et d'apporter la protection nécessaire vis-à-vis des agressions externes.
- ❑ EPR :
 - Deux parois en béton avec un système de confinement dynamique.
 - Peau d'étanchéité métallique dans la paroi interne.



3^{ème} barrière de sûreté
Enceinte de confinement



Aménagement général du BR de Fessenheim



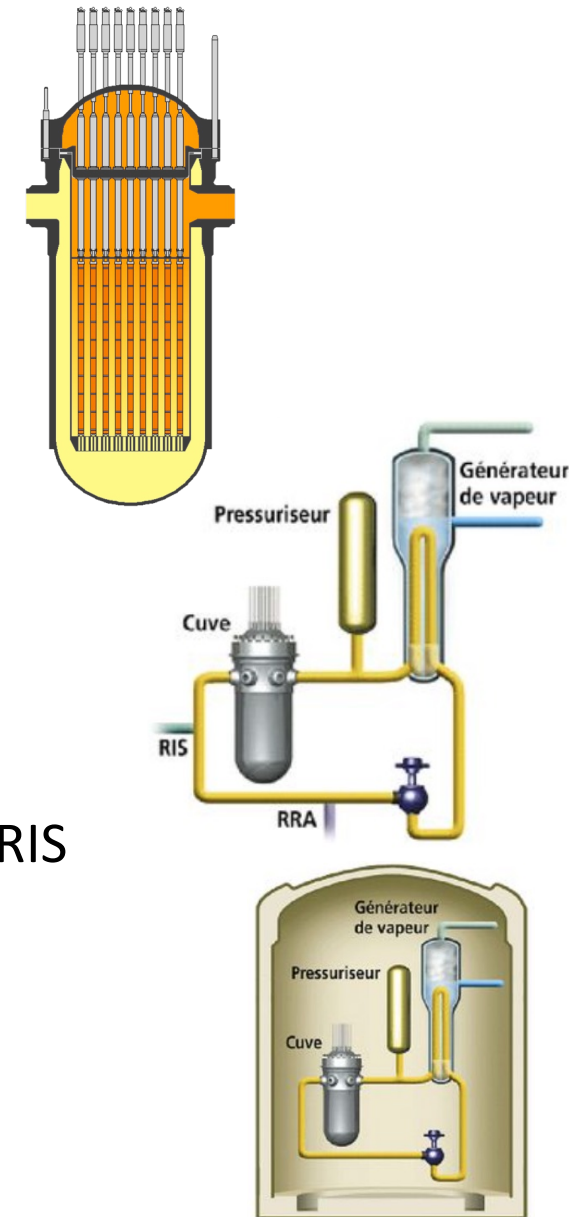
(Source Techniques de l'ingénieur dossier BN3296)

□ La sûreté nucléaire

Les trois fonctions essentielles de la sûreté nucléaire pour un réacteur nucléaire

□ La sûreté nucléaire repose sur le maintien de trois fonctions :

- 1. Contrôle** de la réaction en chaîne, et donc de la puissance produite :
 - Barres de contrôle
 - Concentration en bore (absorbeur de neutrons)
- 2. Refroidissement** du combustible, évacuer la puissance résiduelle:
 - fonctionnement normal : évacuation par les GV
 - À l'arrêt du réacteur : circuit de réfrigération RRA
 - En situation incidentelle/accidentelle : circuit d'injection de sécurité RIS
- 3. Confinement** des produits radioactifs.
 - trois barrières: gaine de combustible, circuit primaire, enceinte de confinement.



Les systèmes auxiliaires

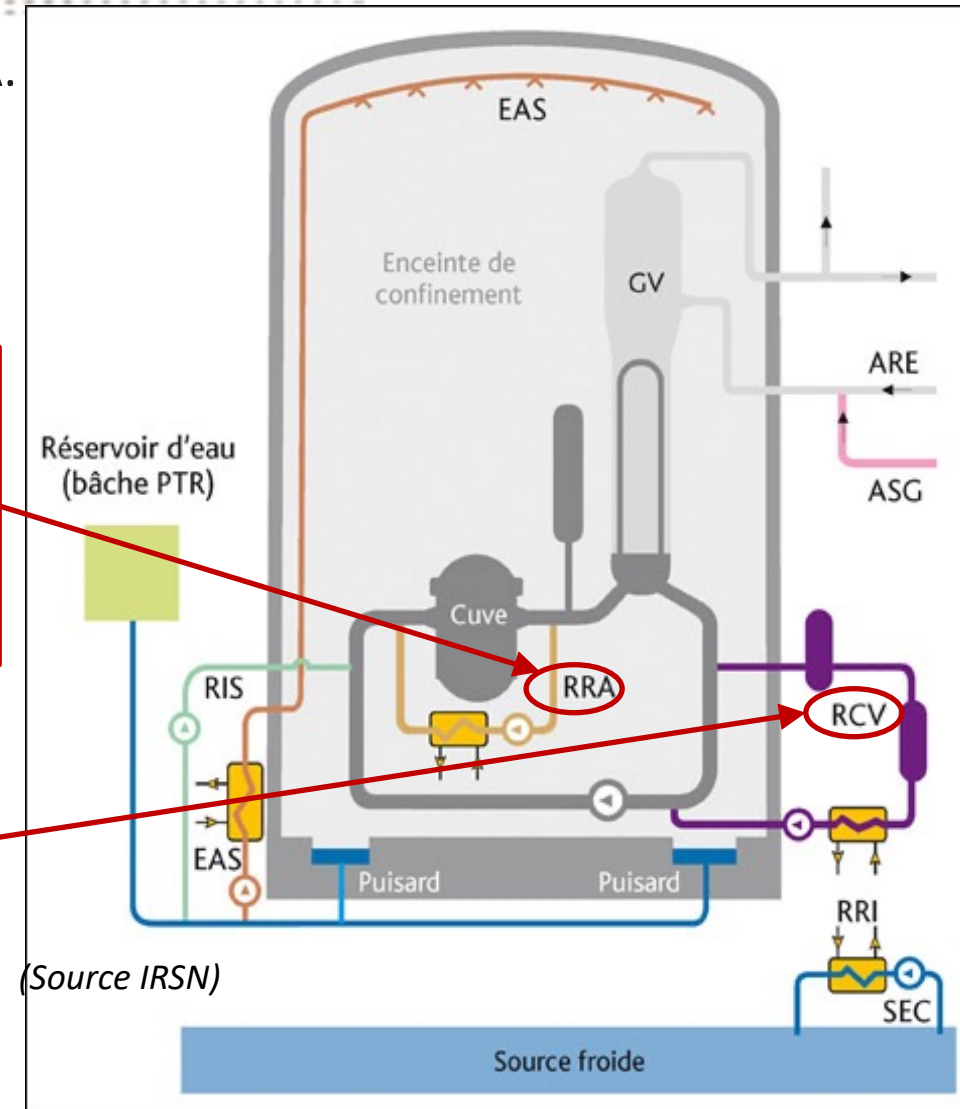
- ❑ Deux circuits auxiliaires sont rattachés au circuit primaire: RCV et RRA.
- ❑ Fonctionnement normal, mise à l'arrêt ou redémarrage,
- ❑ Contribuent aux trois fonctions de sûreté.

RCV = circuit de contrôle chimique et volumétrique du réacteur

- Ajuster la concentration du bore dans l'eau du circuit primaire
- Ajuster la masse d'eau dans le circuit primaire ;
- Ajuster la chimie du circuit primaire (pH, impuretés).

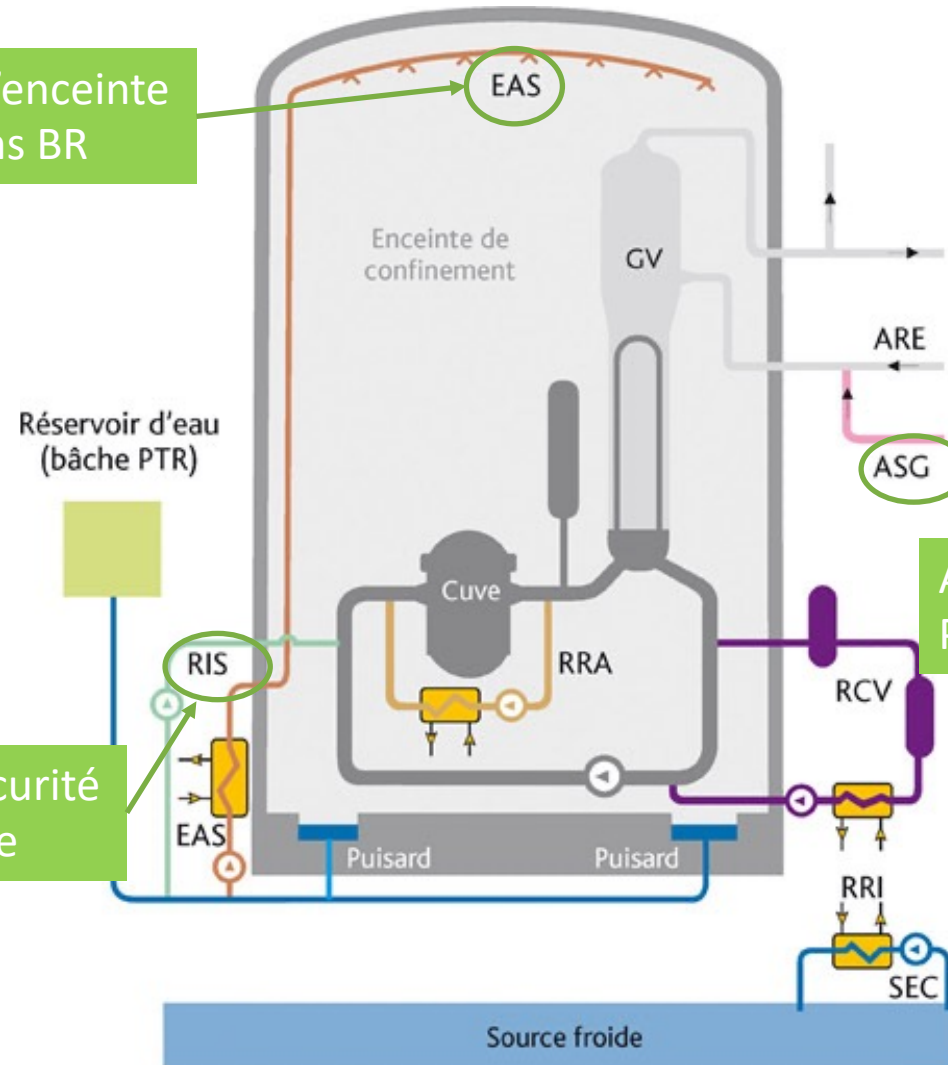
RRA = circuit de refroidissement du réacteur à l'arrêt

- Evacuer la chaleur résiduelle produite par le combustible;
- Refroidir les divers équipements du circuit primaire.



Rôle des systèmes de sauvegarde

EAS= circuit d'aspersion de l'enceinte
Permet de baisser P et T dans BR



ASG = circuit d'alimentation de secours des GV
Prend le relais de ARE si défaillance.

RIS = système d'injection de sécurité
Permet d'injecter de l'eau borée

(D'après IRSN)

Faiblesses d'une centrale nucléaire (p/p aux autres centrales)

- ❑ Coût d'investissement élevé (toutes filières confondues);
- ❑ Arrêts pour rechargement : perte de disponibilité;
- ❑ Mauvaise utilisation de l'uranium;
- ❑ Contraintes d'exploitation résultant de l'enceinte de confinement;
- ❑ Puissance résiduelle du fluide primaire à l'arrêt du réacteur (toutes filières confondues).



Les types de filière de réacteurs

Filière	Combustible	Modérateur	Caloporteur
Graphite -gaz	U naturel	graphite	CO ₂ ou hélium
Eau lourde	U nat ou enrichi	D ₂ O	D ₂ O + H ₂ O
Eau pressurisée	U enrichi	H ₂ O	H ₂ O
Eau bouillante	U enrichi	H ₂ O	H ₂ O
Haute température	U enrichi ou thorium	graphite	hélium
Surgénérateur	U + Pu	aucun	sodium

Merci de votre attention.

