



Energie nucléaire de fission

Principes physiques, possibilités et limites

Marc Ernoult

IJCLab, CNRS-IN2P3 / Université Paris-Saclay



- 1. Contexte: Une source d'énergie très discutée**
- 2. Principes physiques de l'énergie nucléaire*
- 3. Les déchets nucléaires*
- 4. Recyclage et ressources en uranium naturel*
- 5. Gen 4 et Transmutation*



Electricité nucléaire = 0 gCO₂/TWh en fonctionnement

Scenario énergétique GIEC :

« la part de l'énergie nucléaire et des combustibles fossiles avec captage et stockage du CO₂ (CSC) devrait, selon les modèles, augmenter dans la plupart des trajectoires axées sur l'objectif de 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minime »

Scénario énergétique RTE : *Futurs énergétiques 2050*

« Se passer de nouveaux réacteurs nucléaires implique des rythmes de développement des énergies renouvelables insoutenables »

Scénario ADEME 2050 : 3 mix poussant fort énergies renouvelables

« Les caractéristiques propres à l'évolution des capacités non-renouvelables n'ont pas été décrites précisément. Ceci concerne notamment les caractéristiques de l'évolution du parc nucléaire »
Mais tous les Mix ont du nucléaire > 5% (ce qui veut dire plusieurs réacteurs)

Scénario AIE : *Net Zero 2050*

« large increase in energy supply from nuclear power, which nearly doubles between 2020 and 2050 »

COSIM 2050 (Etude IN2P3)

préconise x8 sur le nucléaire à l'échelle mondiale

Electricité nucléaire => place importante dans l'énergie du futur



Contexte: Une source d'énergie très discutée

De l'énergie nucléaire dans le mix de demain en France ?

ifop
2016

Personnellement, êtes-vous pour ou contre l'arrêt des centrales nucléaires en France ?

Pour l'arrêt : 47%

Contre l'arrêt : 53%

Quelles sont les deux raisons qui expliquent le plus que vous soyez pour l'arrêt des centrales ?

- Production de déchets radioactifs pendant des millions d'années
- Crainte d'un accident nucléaire en France

Quelles sont les deux raisons qui expliquent le plus que vous soyez contre l'arrêt des centrales

- Indépendance énergétique
- Production d'électricité à un coût très compétitif



2021
5-6 Octobre

Personnellement, êtes-vous favorable ou pas favorable à la construction de nouveaux réacteurs nucléaires en France dans les prochaines années ?

- Favorable aux nouveaux réacteurs: 51%
- Pas Favorable aux nouveaux réacteurs: 49 %



2022
8-9 Septembre

Personnellement, êtes-vous favorable ou pas favorable à la construction de nouveaux réacteurs nucléaires en France dans les prochaines années ?

- Favorable aux nouveaux réacteurs: 65%
- Pas Favorable aux nouveaux réacteurs: 35 %

Majorité semble favorable au maintien d'une place importante du nucléaire dans le mix énergétique français



Depuis 2021 : positionnement fort de l'état

Fin 2022 : Projet de loi relatif à l'accélération des procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires à proximité de sites nucléaires existants et au fonctionnement des installations existantes :

- supprime l'objectif de réduction à 50% de la part du nucléaire
- acte la construction de nouveaux réacteurs :
 - (EPR2 et petits réacteurs modulaires (SMR))
- **On part sur le scénario N03 de RTE : maintien de la puissance proche du niveau actuelle jusqu'à la fin du siècle**



- **Avis du Conseil National de la Transition Ecologique :**
 - **Création de réacteurs : Projet d'intérêt général majeur complémentaires au développement accéléré des énergies renouvelables**
 - **Aimerait :**
 - Plus de consultation
 - Plus d'études d'impacts

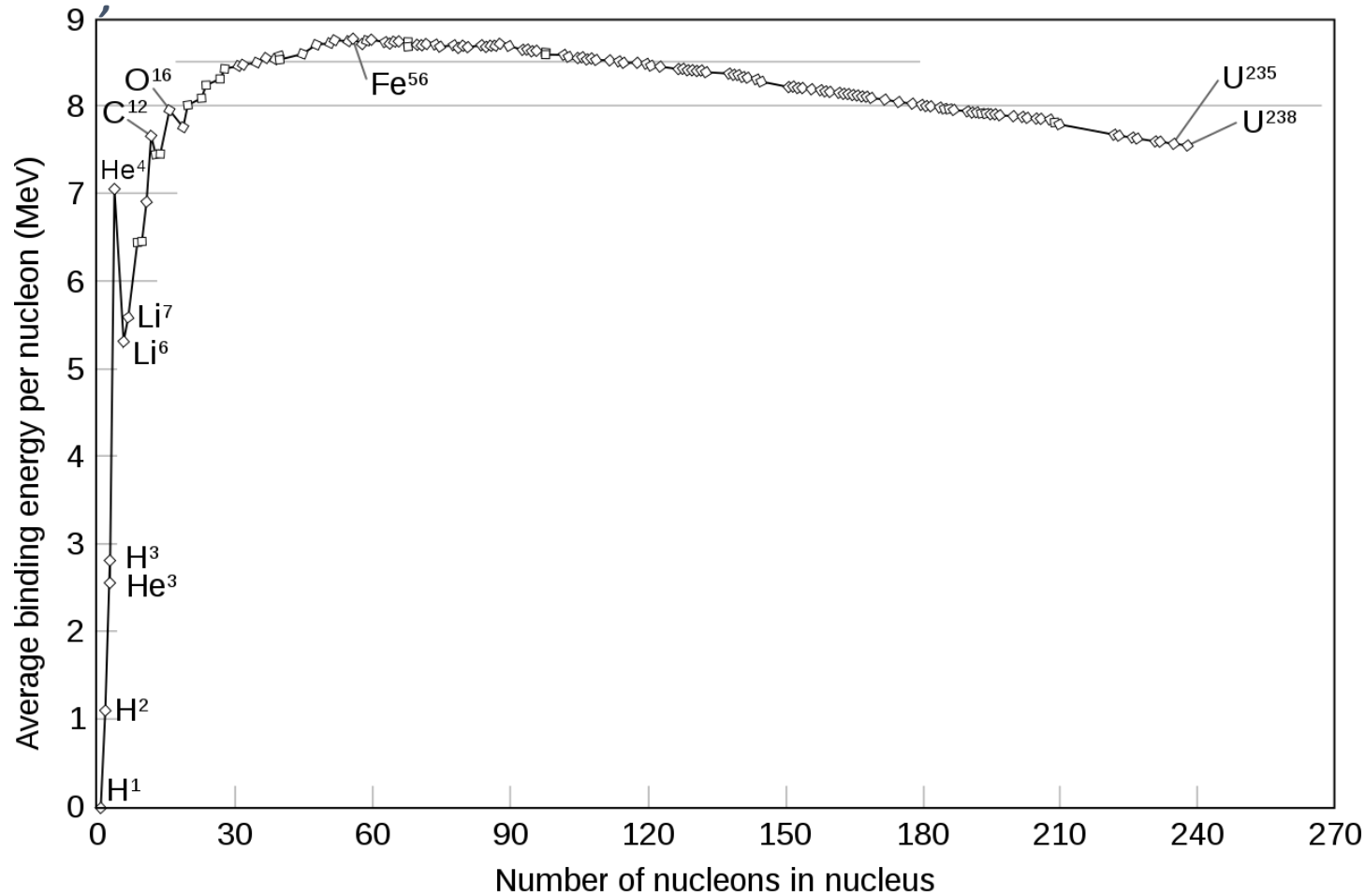


1. *Contexte: Une source d'énergie très discutée*
2. **Principes physiques de l'énergie nucléaire**
3. *Les déchets nucléaires*
4. *Recyclage et ressources en uranium naturel*
5. *Gen 4 et Transmutation*



Principes physiques de l'énergie nucléaire

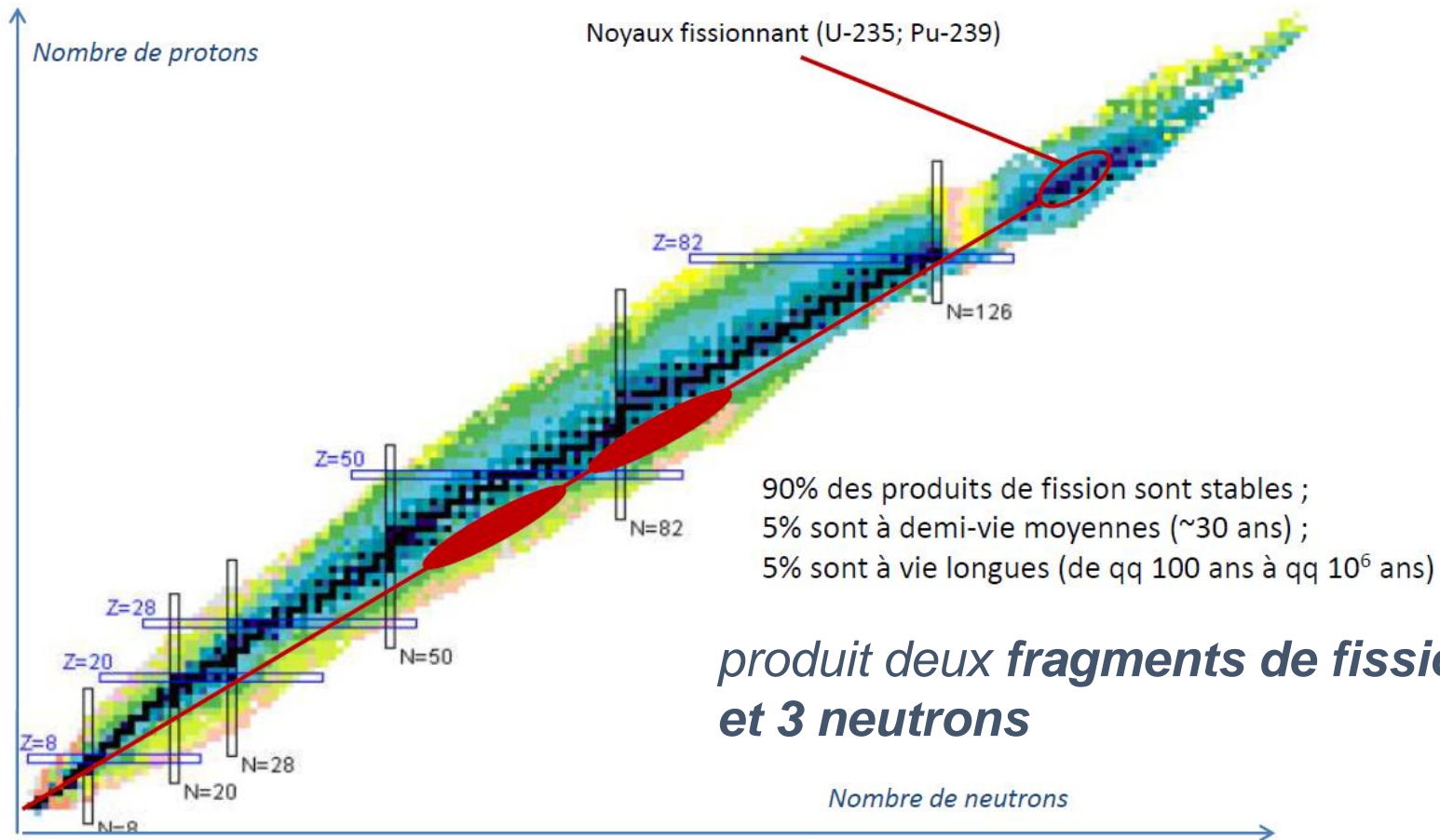
La fission des noyaux lourds libère une grande quantité d'énergie (200 MeV)





Principes physiques de l'énergie nucléaire

La fission des noyaux lourds libère une grande quantité d'énergie (200 MeV) => 1 tonne fissionnée donne 1GW.an (soit 8,8 TWh)

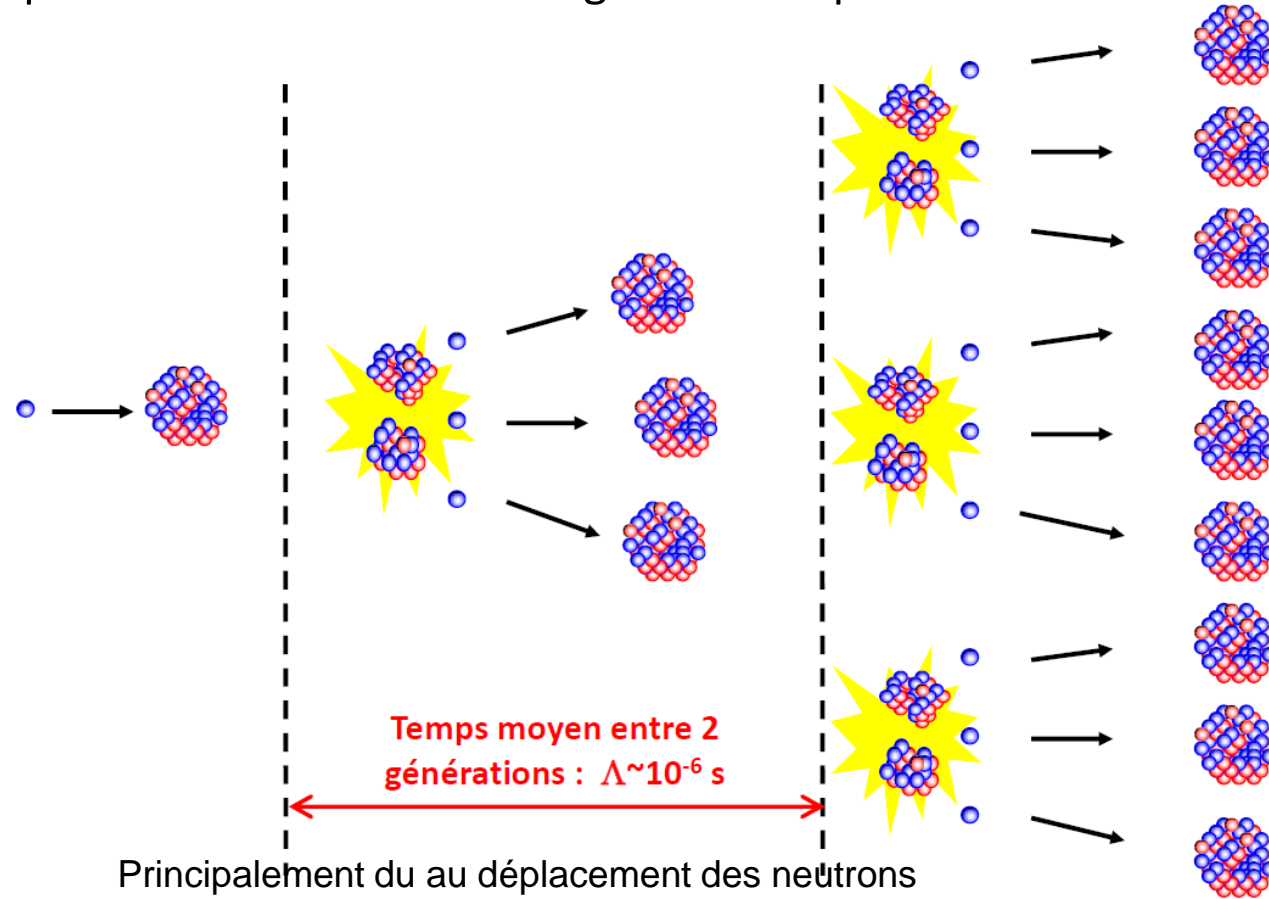




Principes physiques de l'énergie nucléaire

1 fission $\sim 200\text{MeV} \Rightarrow 1\text{W} \sim 3.10^{10}$ fissions par seconde

La production continue d'énergie est faite par le maintien de la réaction en chaîne



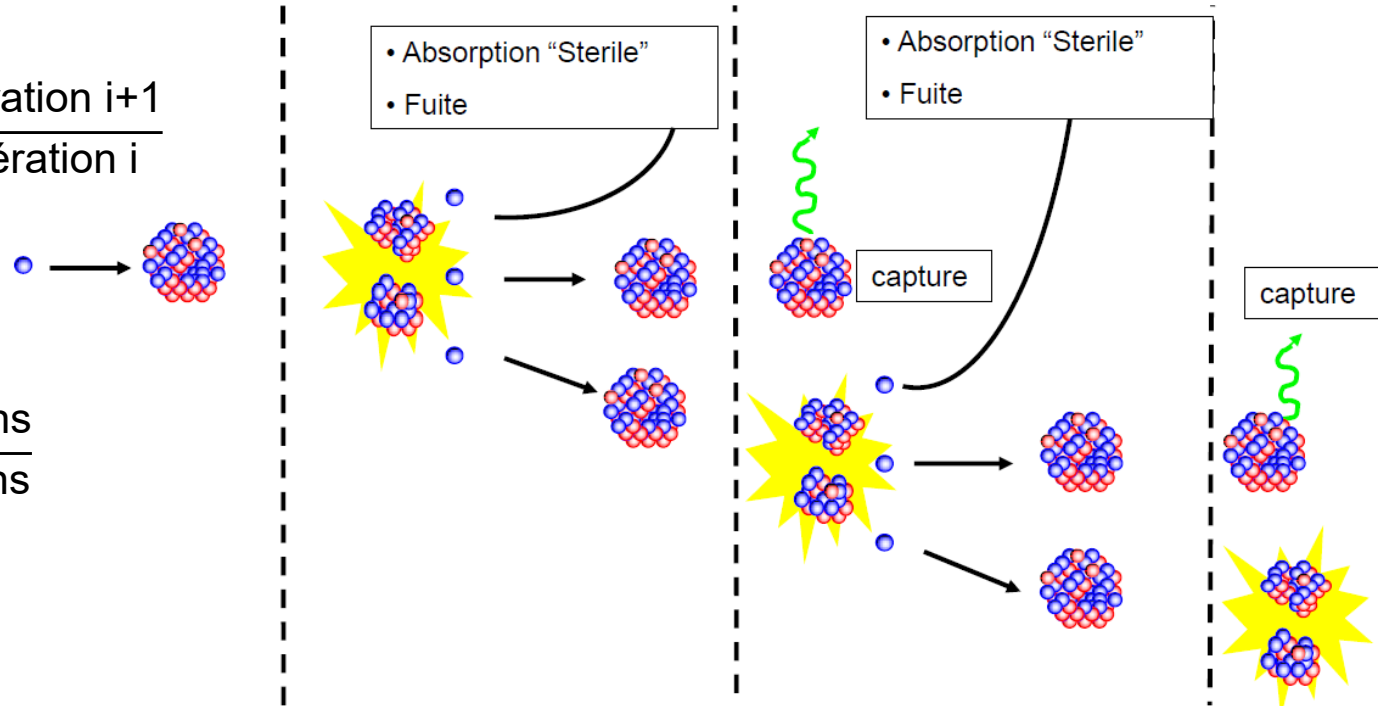


Principes physiques de l'énergie nucléaire

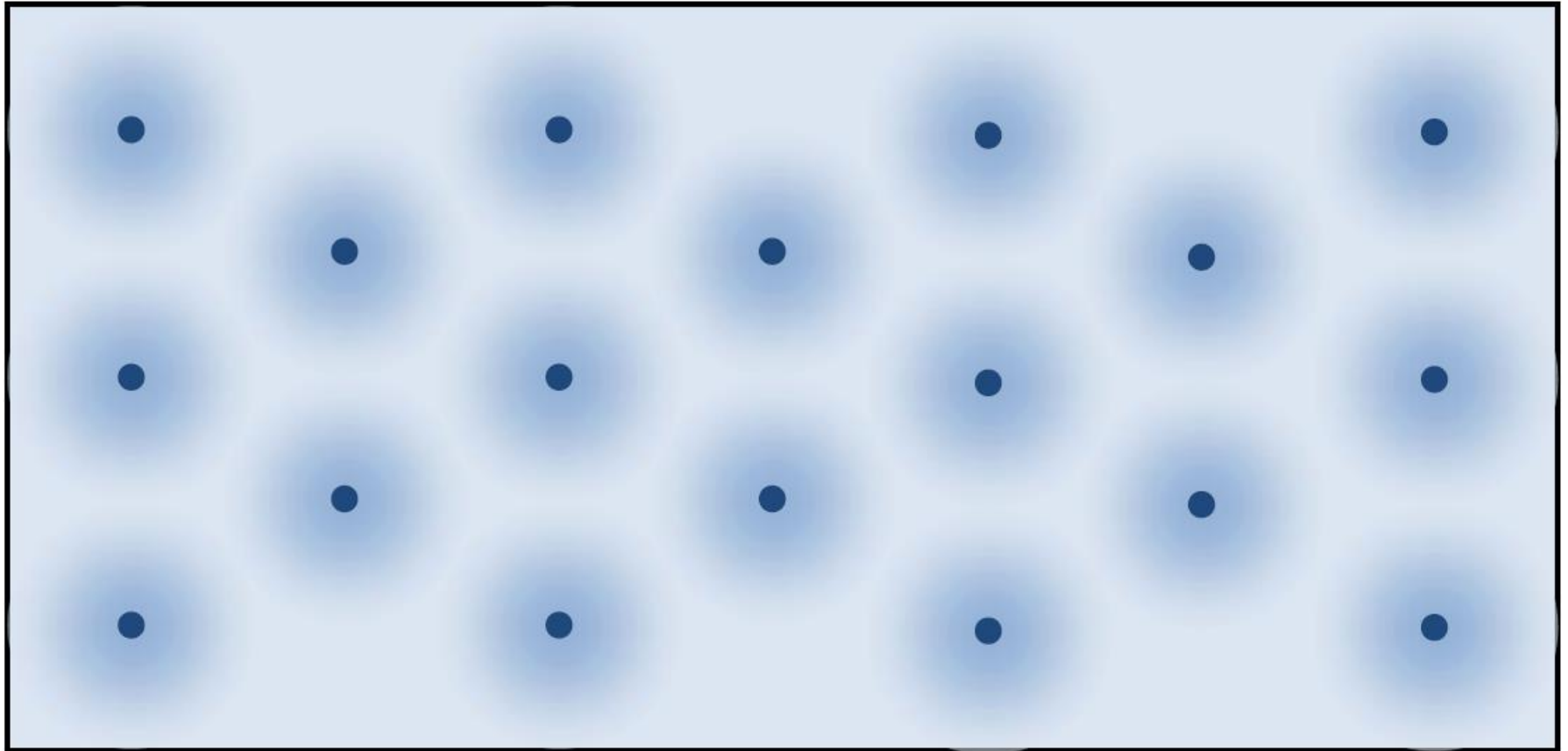
On définit la criticité (ou la réactivité) ou la multiplication des neutrons (k)

$$k_{eff} = \frac{\text{Nombre de fission à la génération } i+1}{\text{Nombre de fission à la génération } i}$$

$$k_{eff} = \frac{\text{Production de neutrons}}{\text{Disparition de neutrons}}$$



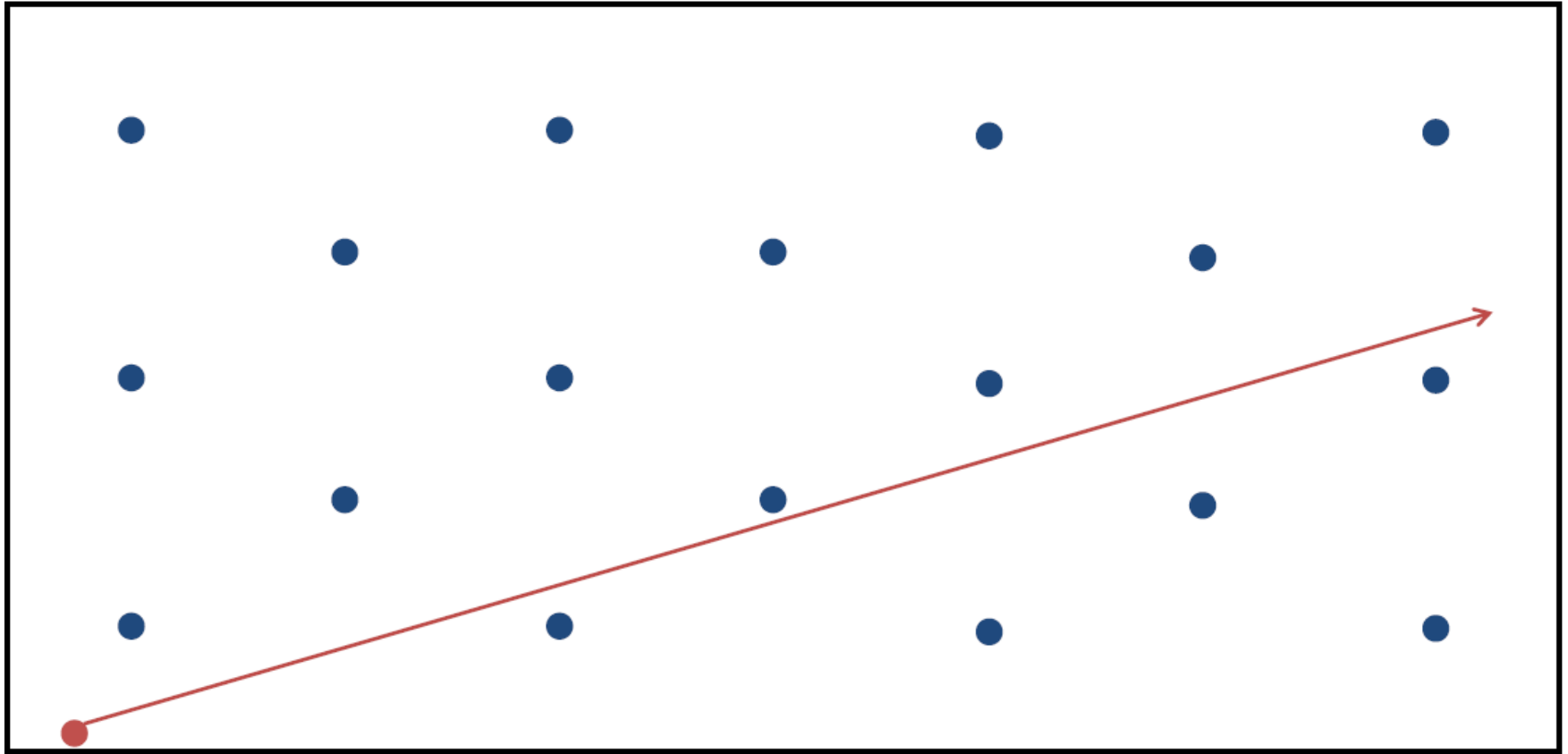
$k=1 \rightarrow$ Nombre de fission par seconde (= puissance) constant \rightarrow Réaction stable



Neutrons neutres => interaction seulement avec les noyaux



Principes physiques de l'énergie nucléaire



Les neutrons parcourent de grandes distances sans interagir avec la matière

➤ Pas de système nucléaire de taille « microscopique »



Principes physiques de l'énergie nucléaire

Taux de réaction :

$$R_{r,i} = N_i \times \sigma_{r,i} \times \Phi$$

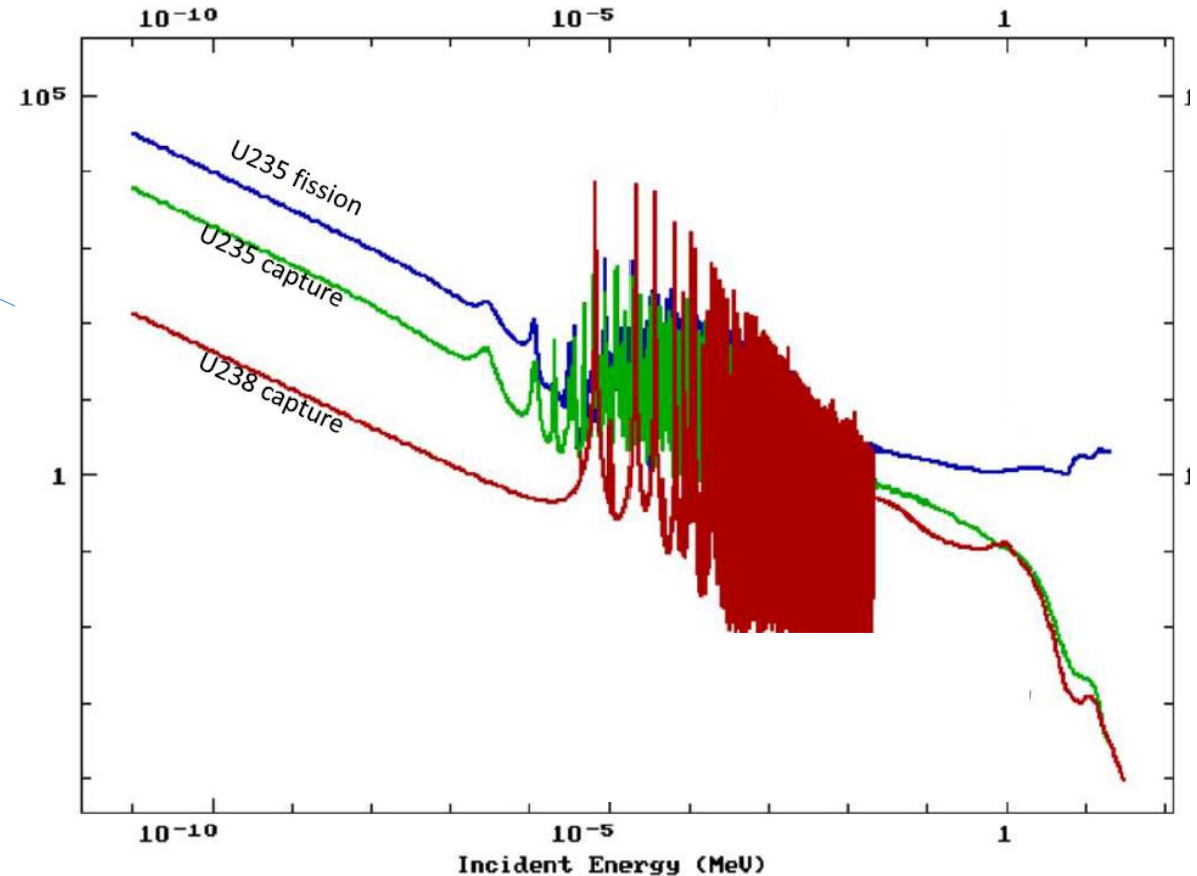
Flux de neutrons (*neutrons. s⁻¹. cm⁻²*)

Densité de noyau i (*noyau. cm⁻³*)

$\sigma_{r,i}$ dépend de l'énergie du neutron et de la matière traversée.

Pour représenter l'interaction avec la matière, on considère

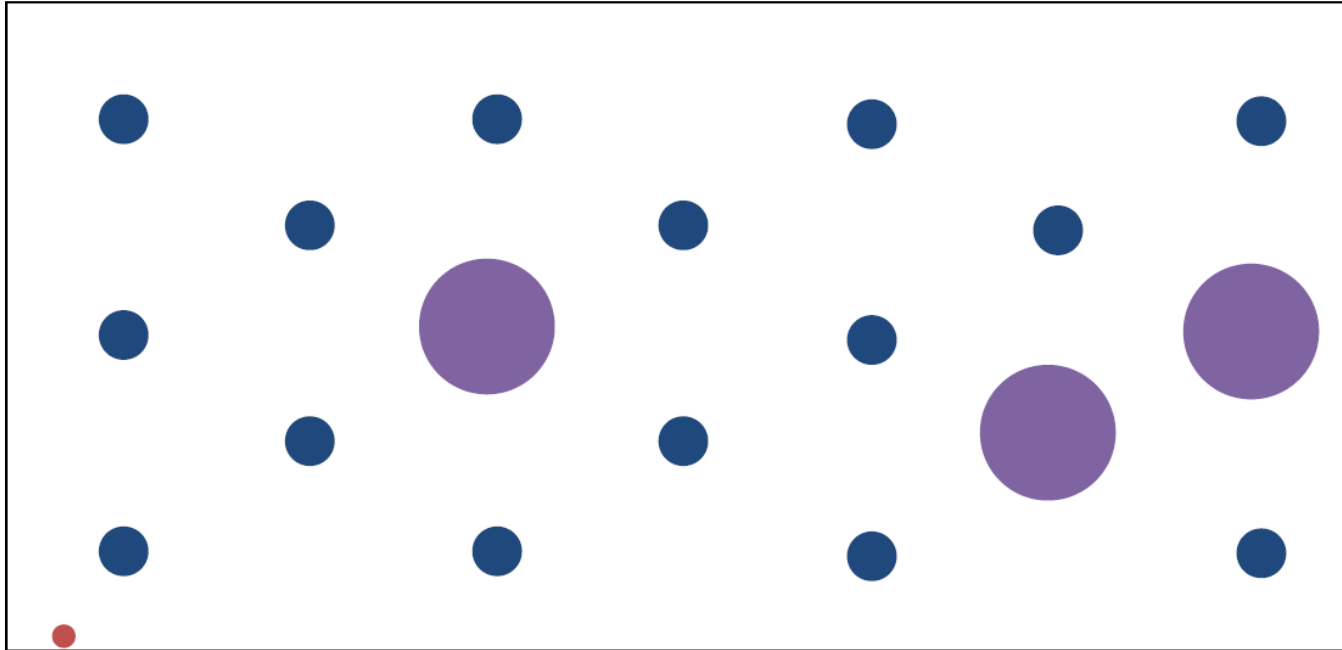
$$\Sigma_{r,i} = N_i \sigma_{r,i}$$





Principes physiques de l'énergie nucléaire

Tout ce passe comme si le volume des noyaux dépendait de la vitesse du neutron
→ Quand les neutrons sont lents, la taille relative des noyaux d' ^{235}U augmente



Pour économiser les ressources et le travail d'enrichissement on peut ralentir les neutrons



Principes physiques de l'énergie nucléaire

Taux de réaction :

$$R_{r,i} = N_i \times \sigma_{r,i} \times \Phi$$

Flux de neutrons (*neutrons. s⁻¹. cm⁻²*)

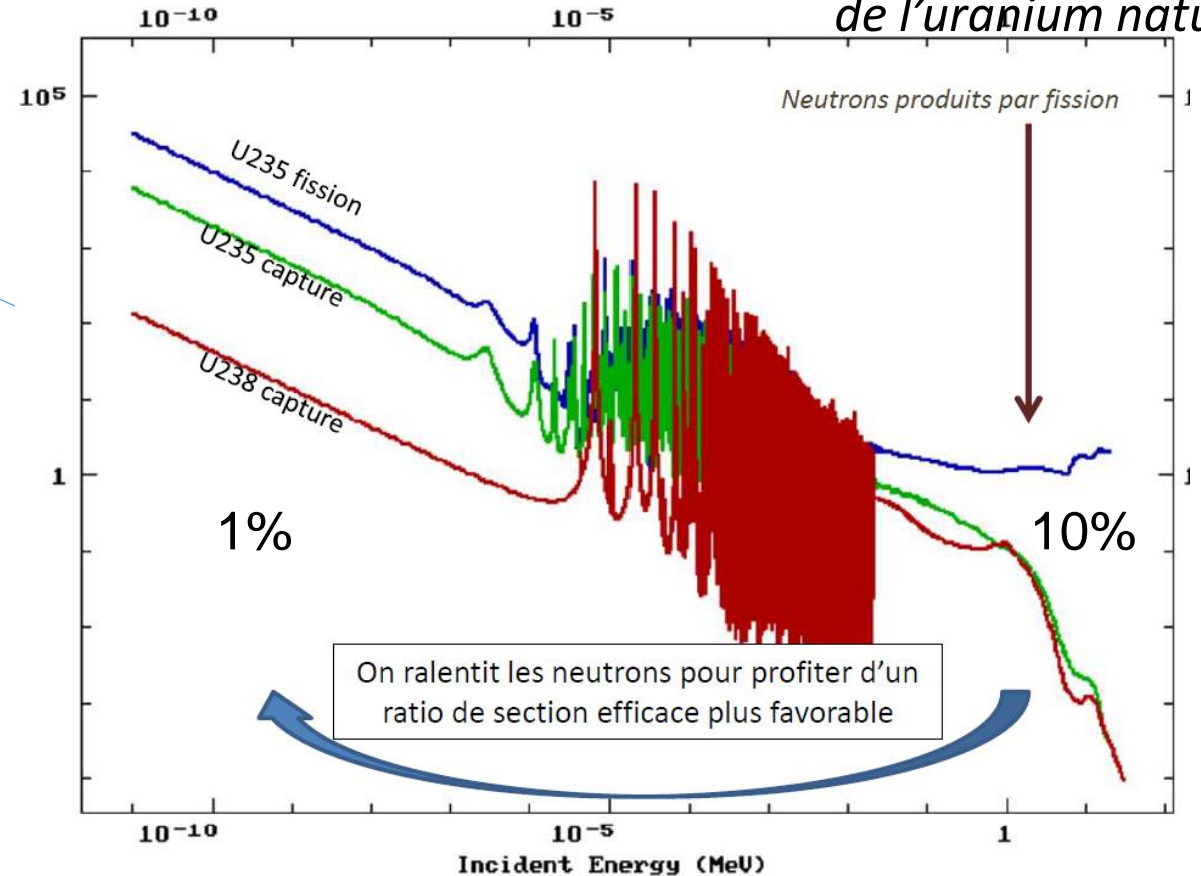
Densité de noyau i (*noyau. cm⁻³*)

$\sigma_{r,i}$ dépend de l'énergie du neutron et de la matière traversée.

Pour représenter l'interaction avec la matière, on considère

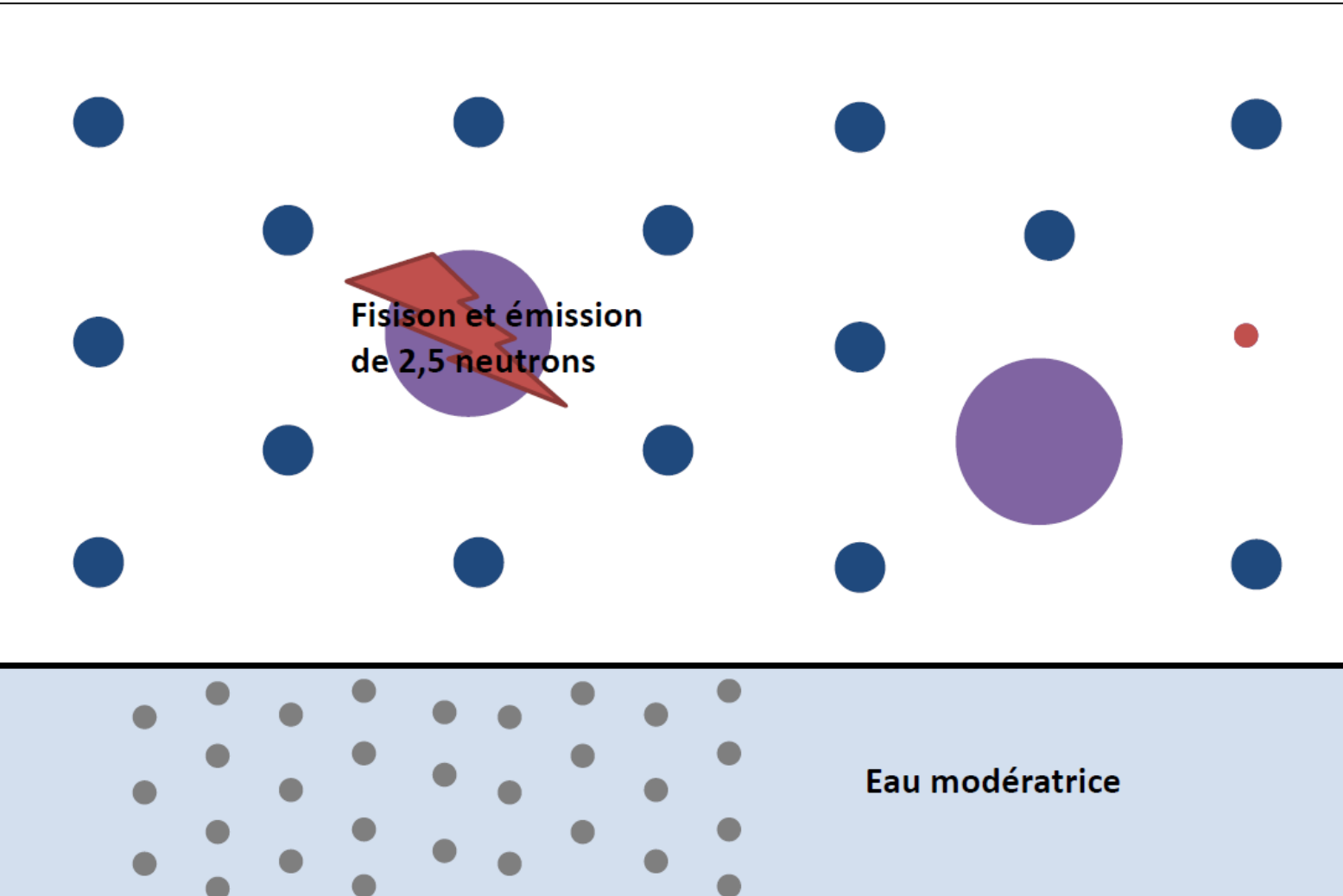
$$\Sigma_{r,i} = N_i \sigma_{r,i}$$

L'uranium 235 ne représente que 0,7% de l'uranium naturel





Principes physiques de l'énergie nucléaire



Pour ralentir les neutrons, on utilise le plus souvent de l'eau

Elle permet aussi

- Refroidir le combustible

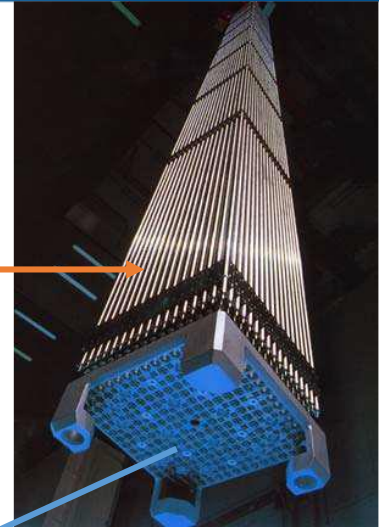
Pour maintenir la puissance :
Sur les 2,5 neutrons émis par la fission, 1 seul provoque une autre fission. Les autres sont absorbés par d'autres noyaux



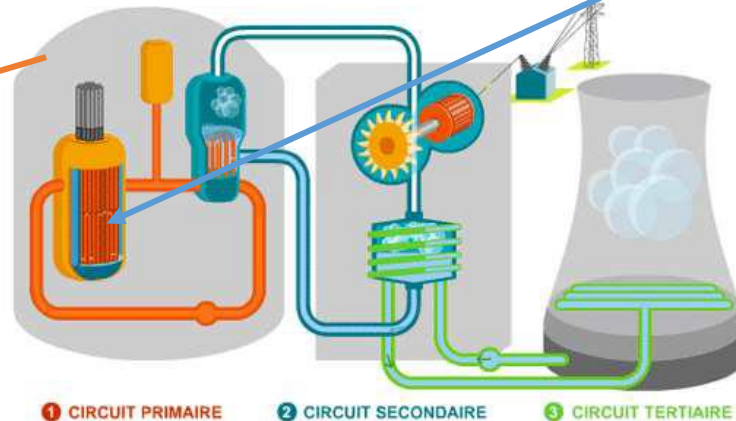
Principes physiques de l'énergie nucléaire

Résultat d'un compromis entre ralentissement et enrichissement

- Uranium enrichi entre 3 et 5%
- Chaque assemblage est constitué de 264 crayons (17 x 17)



L'eau circule dans l'espace entre les crayons - refroidit le combustible et ralentit les neutrons

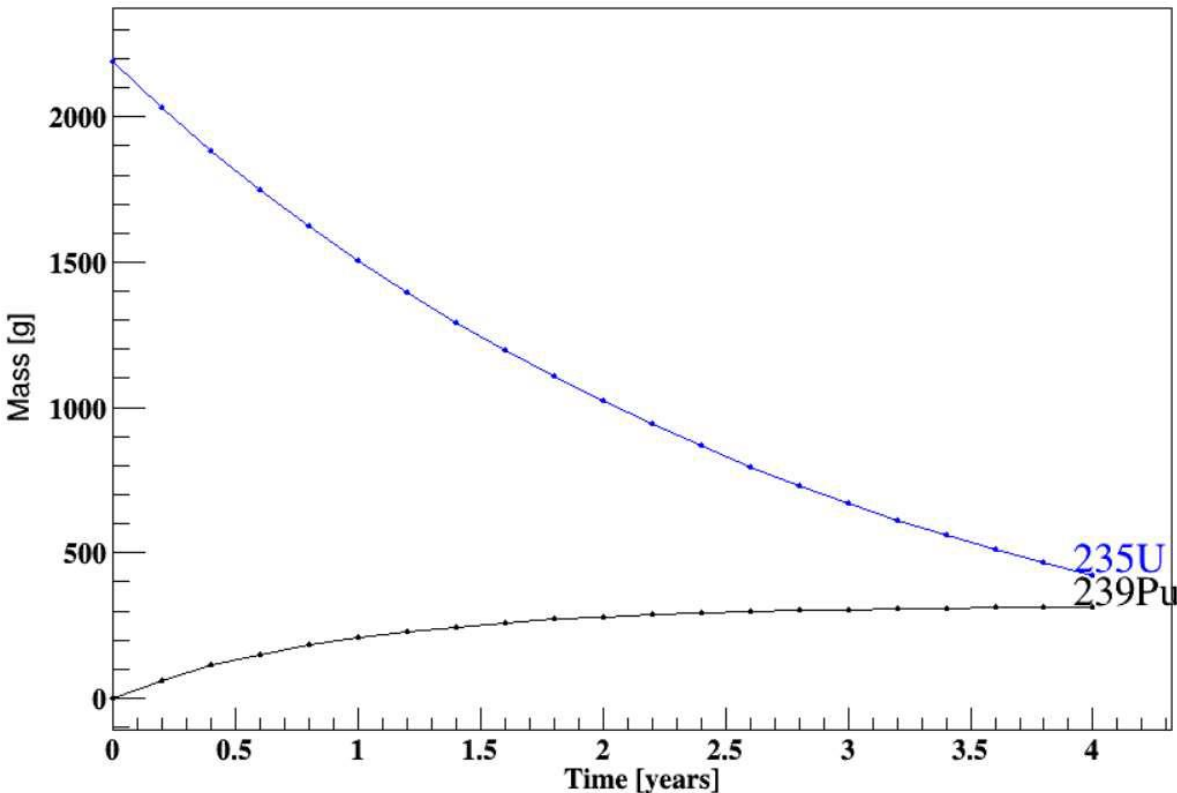




Principes physiques de l'énergie nucléaire

Lors de l'irradiation la composition du combustible évolue
L'évolution de chaque noyau est régit par l'équation :

$$\frac{dN_i}{dt} = -\lambda_i N_i - \sigma_{a,i} N_i \phi + \sum_j \lambda_{j \rightarrow i} N_j + \sum_j \sigma_{j \rightarrow i} N_j \phi$$



Temps caractéristique : jours/moi/années
Lent devant le temps neutroniques

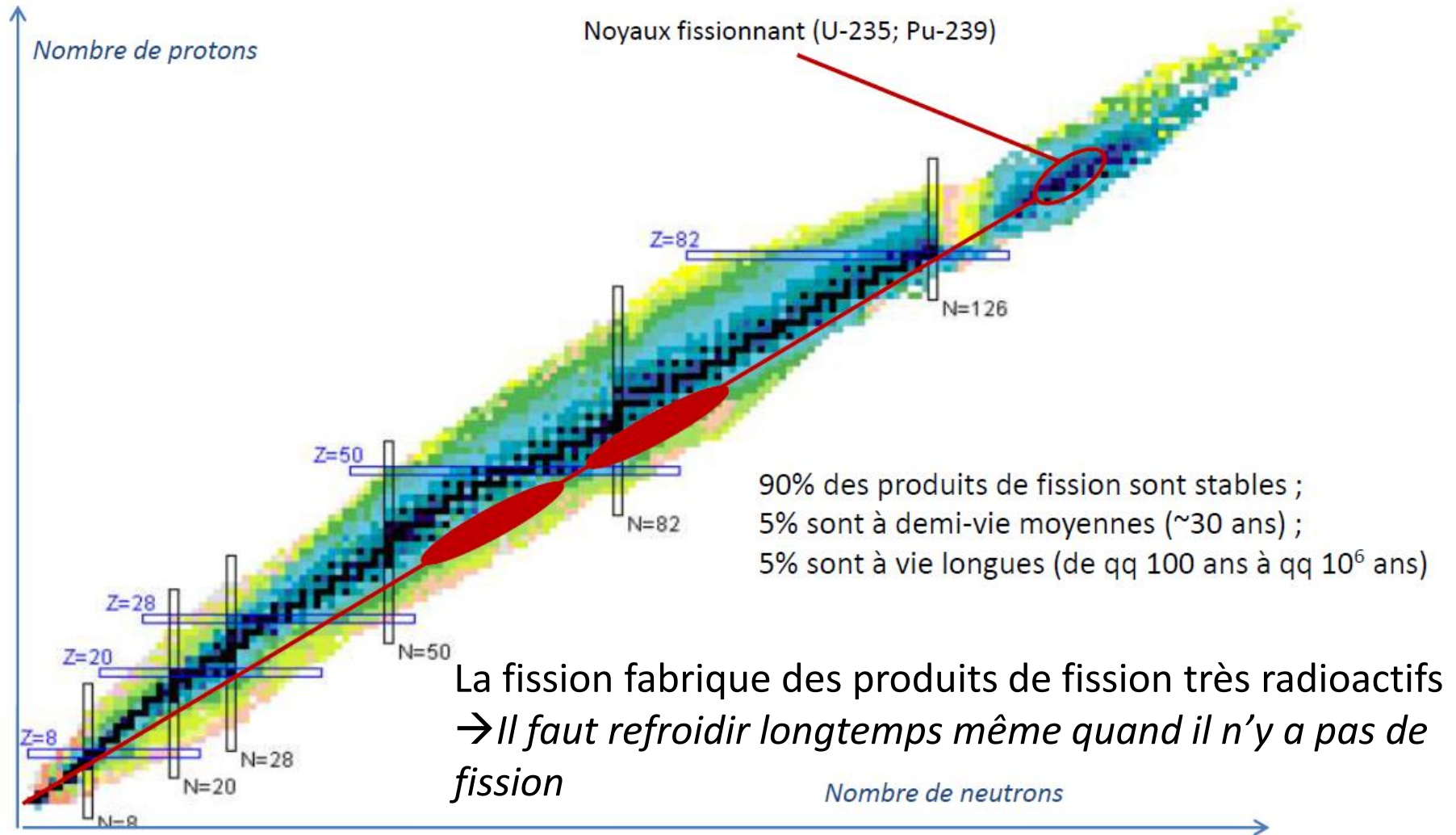
Constantes de décroissance

Distribution de produit de fission

➤ Dépend des propriétés nucléaires des nucléides considérées

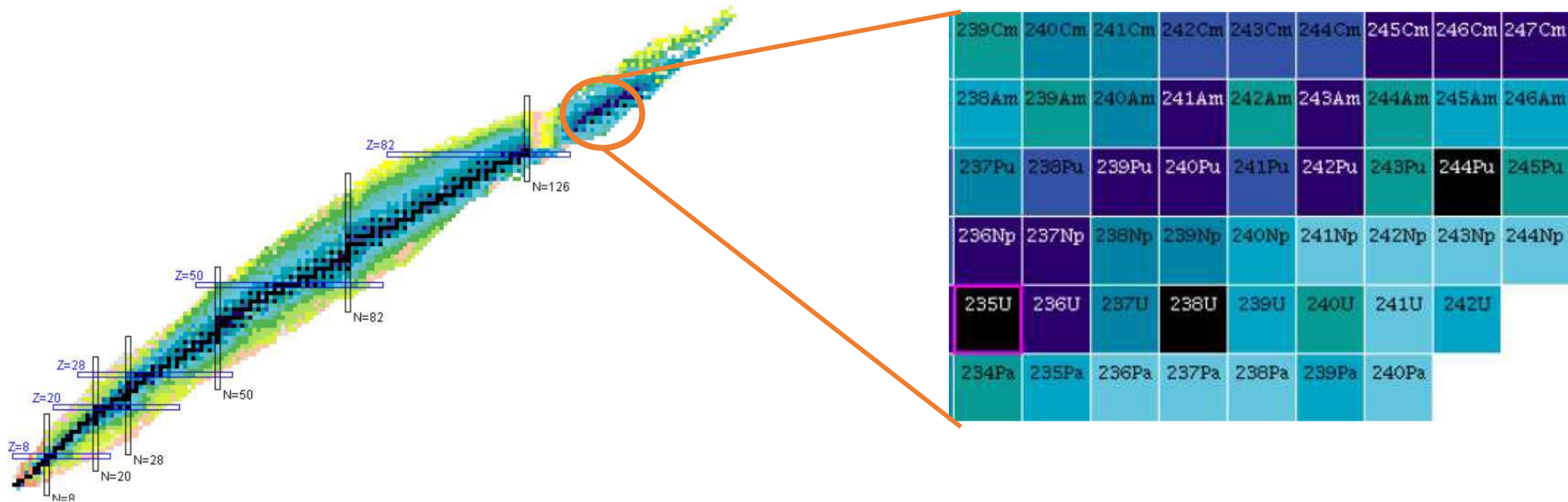


Principes physiques de l'énergie nucléaire





Principes physiques de l'énergie nucléaire



L'irradiation produit des noyaux lourds par captures neutroniques :

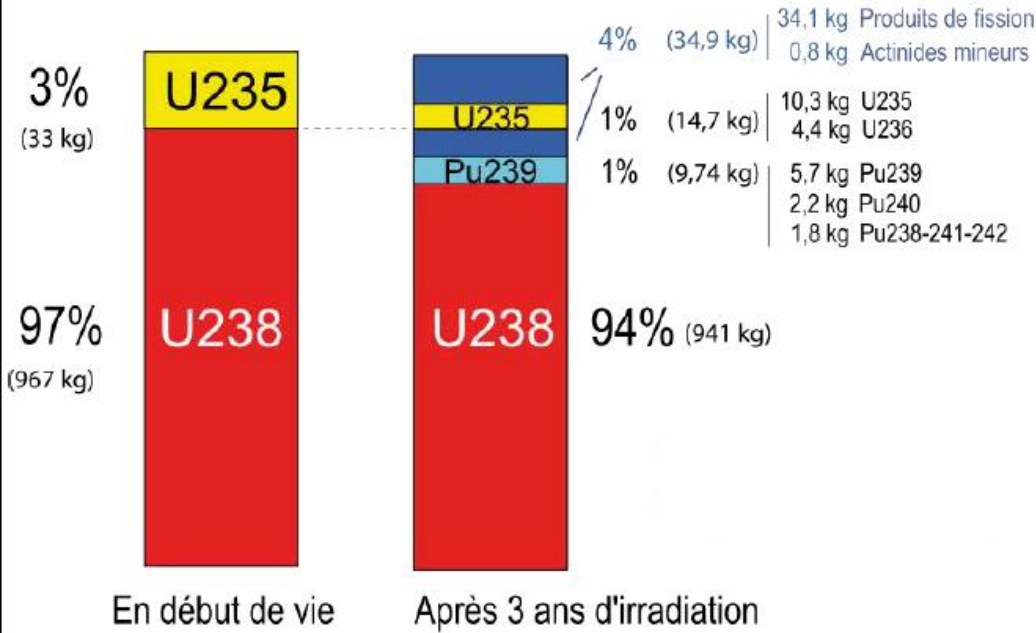
- Le plutonium est produit par capture sur l'238U
- Les noyaux lourds d'autres éléments sont les actinides mineurs !



1. *Contexte: Une source d'énergie très discutée*
2. *Principes physiques de l'énergie nucléaire*
3. **Les déchets nucléaires**
4. *Recyclage et ressources en uranium naturel*
5. *Gen 4 et Transmutation*



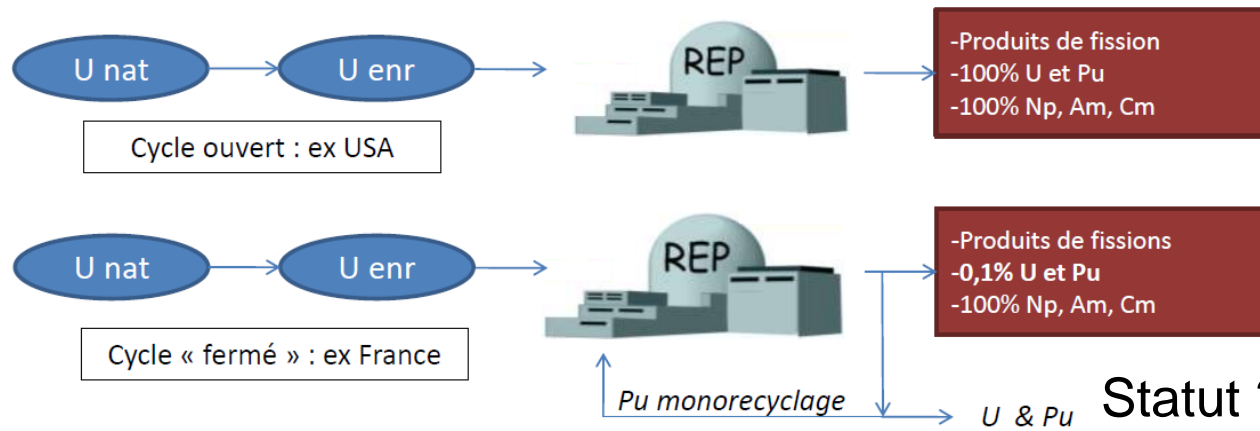
Les déchets nucléaires



« 96 % des combustibles usés sont ré-utilisable »

Déchets : « un déchet radioactif est une matière radioactive pour lequel aucune utilisation n'est prévue ni envisagée » loi française (2006)

➤ Recycler pour diminuer les déchets

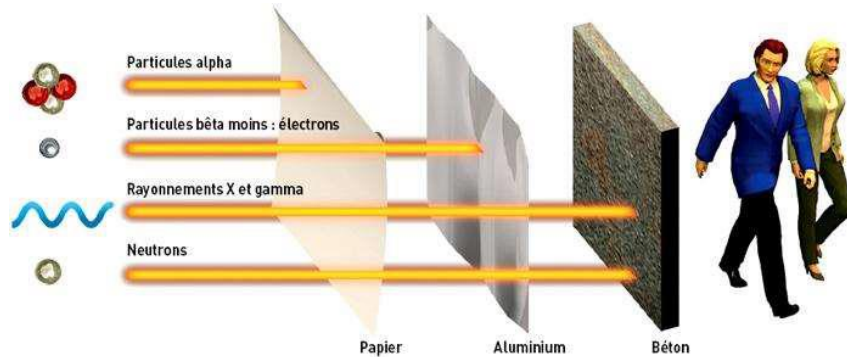


Statut ?



Les déchets nucléaires

Comment qualifier les déchets nucléaires ?



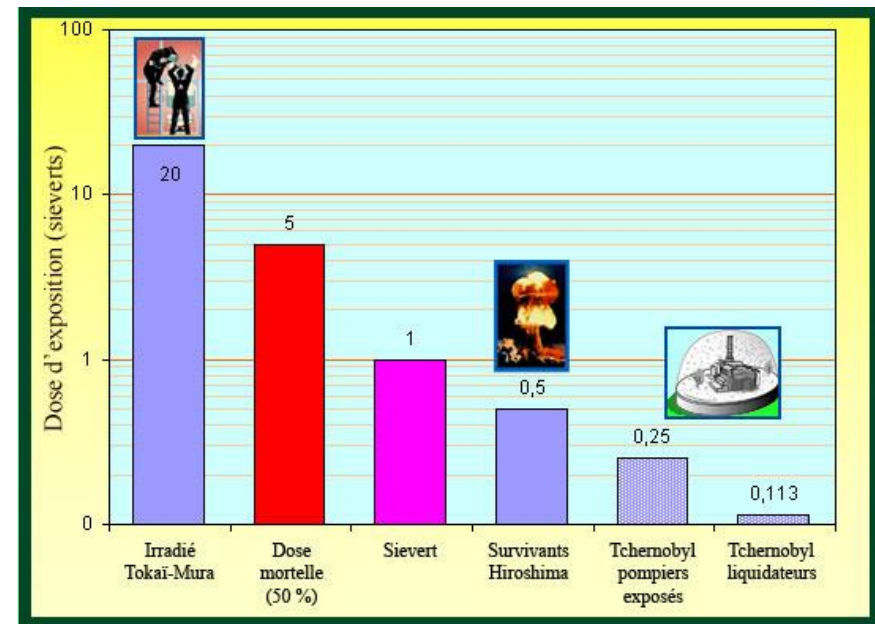
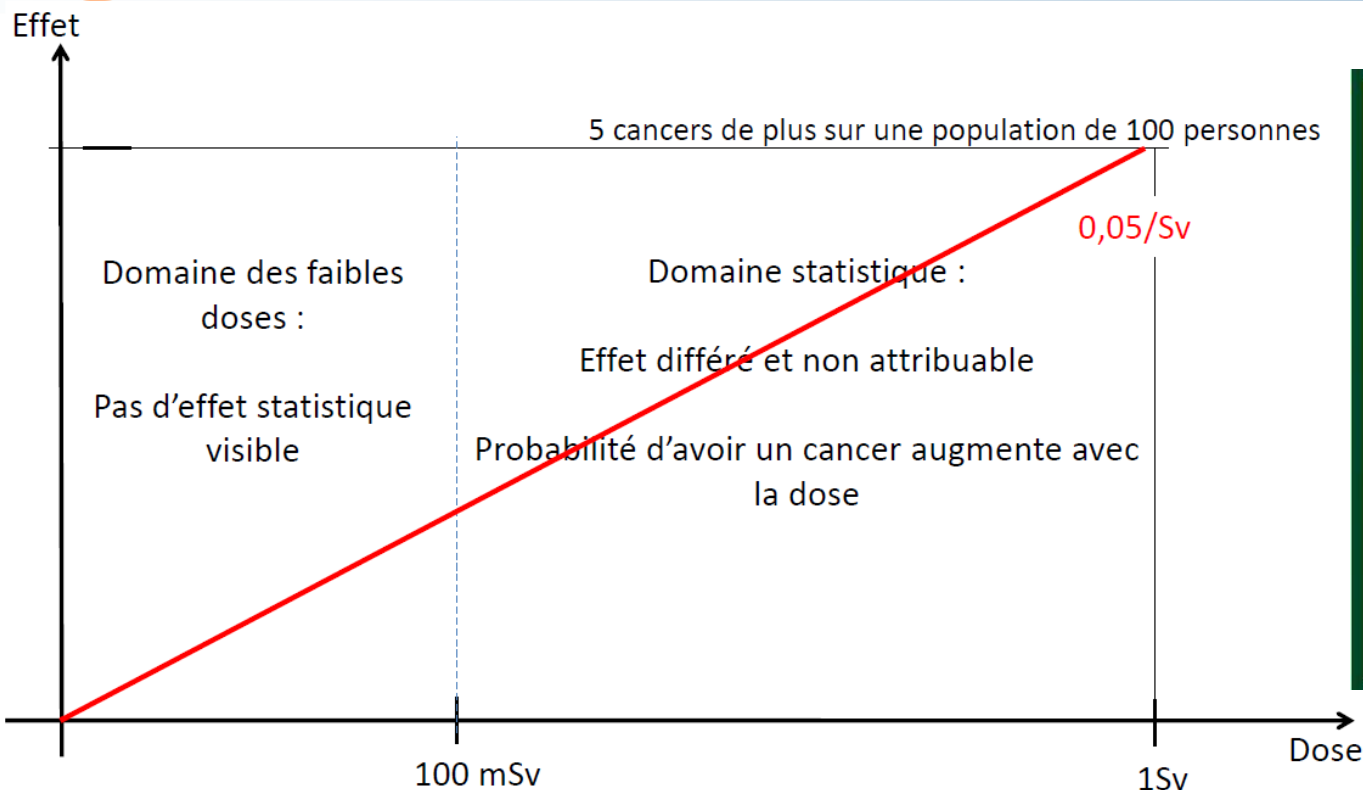
*Spécificité : radioactivité,
rayonnement ionisant due à la décroissance*

- Unité de la radioactivité : le Becquerel → Activité de l'homme : ~1000 Bq/kg
- Pour mesurer les dommages on peut utiliser le Gray ; c'est l'énergie massique déposé (1Gy = 1J /kg)
- -Pour mesurer les effets sur le corps humain, on utilise encore une autre unité : le Sievert (unité de radiotoxicité) !





Les déchets nucléaires

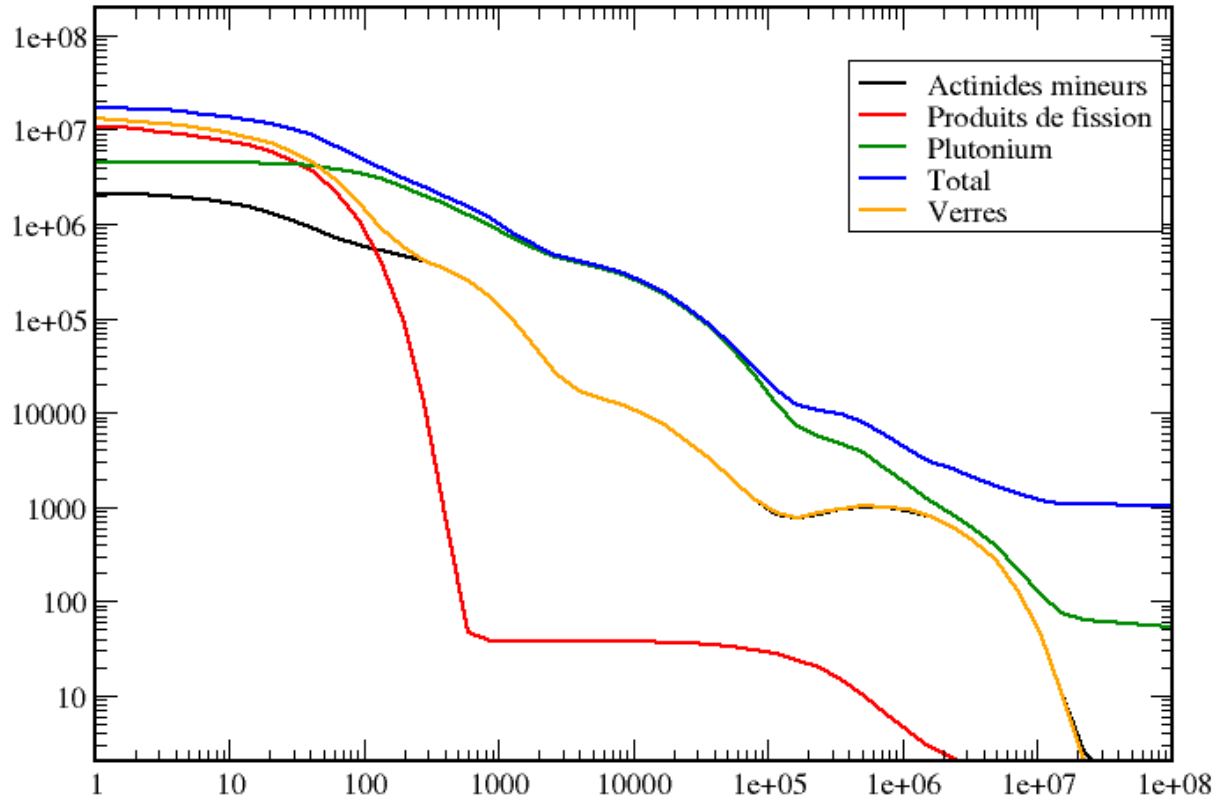


La commission internationale de protection radiologique (CIPR) fait l'hypothèse que l'effet reste proportionnel à la dose
Pour les fortes doses reçues en peu de temps, il y a en plus brûlure radiative



Les déchets nucléaires

Radiotoxicité (Sievert) : un moyen de quantifier la dangerosité des matières



Le sievert est une unité construite pour quantifier les dommages des radiations sur le corps humain

- *Hypothèse de calcul : on considère une exposition par ingestion*
- *la radiotoxicité ne présente rien de réel mais est un bon moyen pour comparer les déchets*

Il faut prévoir ce qu'il adviendra des déchets pendant environ 10⁵, 10⁶ années



Depuis 2006, 5 plans nationaux de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR).
Plusieurs débats publics :

2013 - Débat public organisé autour du Projet de centre de stockage réversible profond de déchets radioactifs

2019- Débat public organisé sur le gestion des matières et déchets radioactifs

- Chaque débat nécessite la rédaction d'un rapport par les experts pour expliquer les conséquences de chaque choix proposé
- Des citoyens donnent leur avis sur les solutions proposées

Solution actuellement retenue :

Stockage géologique profond dans un centre en Meuse/Haute-Marne
CIGEO

Autres solutions envisagées :

- Entreposage sous surveillance
- Stockage en sub-surface
- Transmutation poussée

Il y a eu d'autre débat public sur le nucléaire notamment celui préalable au lancement du Projet Flamanville 3 (l'EPR de Flamanville)



Les déchets nucléaires



L'inventaire prévu pour CIGEO :

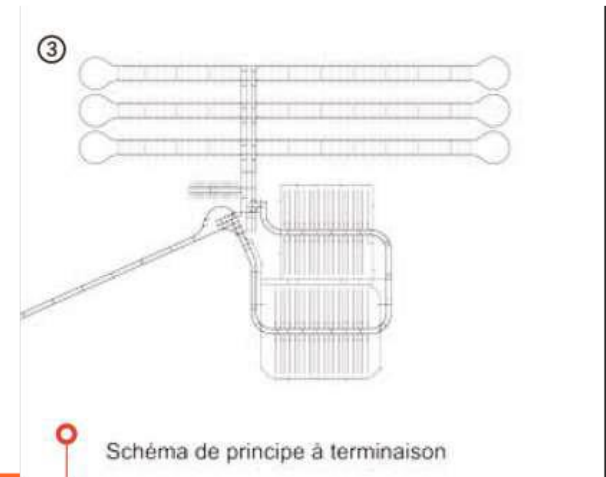
CIGEO ne concerne que les déchets produits et « à produire » des **réacteurs actuels**

60 % des MA-VL et 30% des HA-VL de CIGEO sont déjà produits

La surface total représente environ 15 km² à terme

5% du total des déchets HA seront installé en 2025 dans CIGEO pour observation pendant 50 ans.

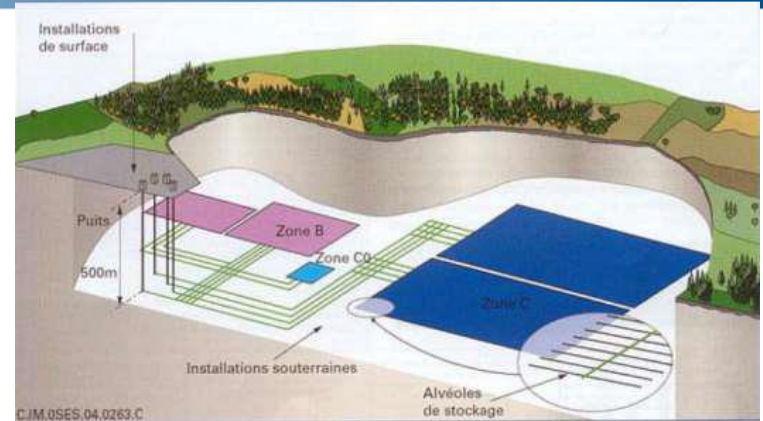
- Le stockage industriel des HA ne débutera donc pas avant 2075 !





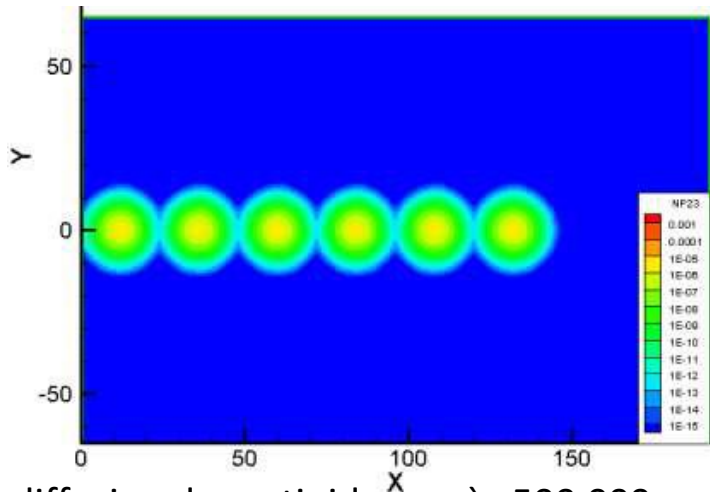
Les déchets nucléaires

Design de colis et choix du site pour minimiser la contamination sans intervention humaine pendant des temps très longs

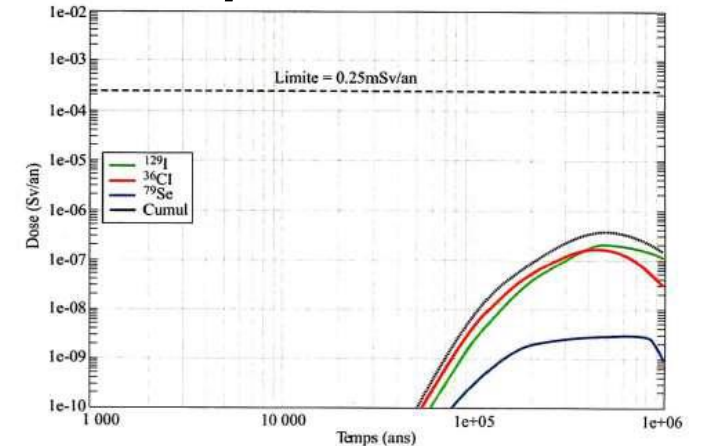


Est-ce que les déchets remonteront jusqu'à la biosphère ?

Les simulations disent que non



Exemple : diffusion des actinides après 500 000 ans ~ 15 m



Dose maximale à la surface du au stockage



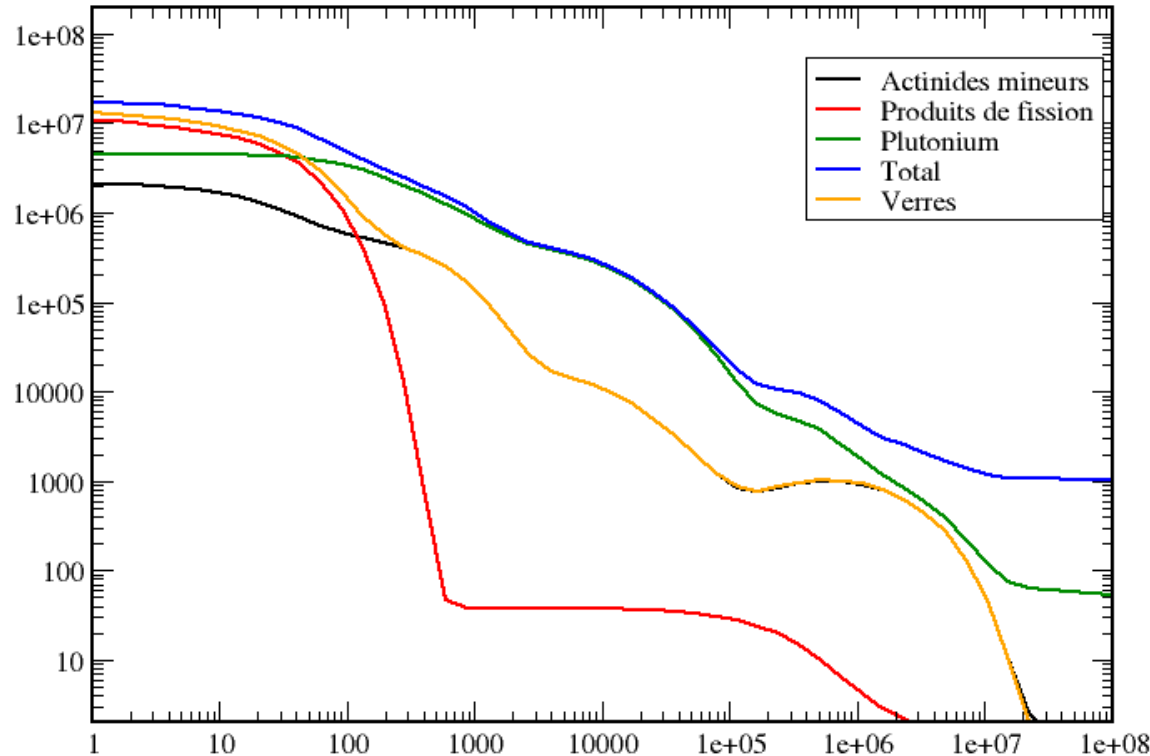
1. *Contexte: Une source d'énergie très discutée*
2. *Principes physiques de l'énergie nucléaire*
3. *Les déchets nucléaires*
4. **Recyclage et ressources en uranium naturel**
5. *Gen 4 et Transmutation*



Recyclage et ressources

La définition des déchets conditionne le débat

➤ *L'essentiel de la radioactivité est contenu dans le plutonium qui n'est pas un déchet !*



Si le Pu n'est pas un déchet → 1 CIGEO

Si le Pu est un déchet → 10 CIGEO

Si full RNR on a pas assez

Si c'est un déchet on a en a déjà trop

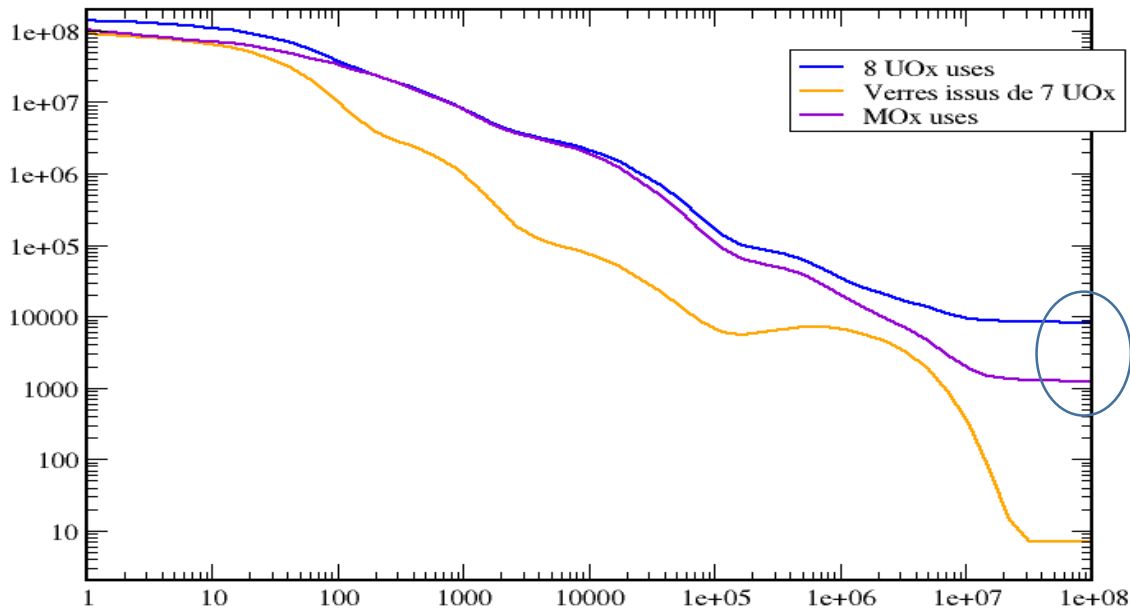
Faut-il considérer le Pu comme : déchet principal/ressource précieuse ?



Recyclage et ressources

Le plutonium peut être utilisé comme matière fissile pour remplacer l'uranium 235.

- *Utilisation des combustibles Mox pour économiser l'uranium*
- *Incinération du plutonium pour faire décroître la radiotoxicité des matières irradiées*



La différence vient de l'uranium de retraitement, entreposé ailleurs

7 Uox usés produisent le plutonium nécessaire pour un assemblage MOx

→ On remplace donc 1 assemblage sur 8

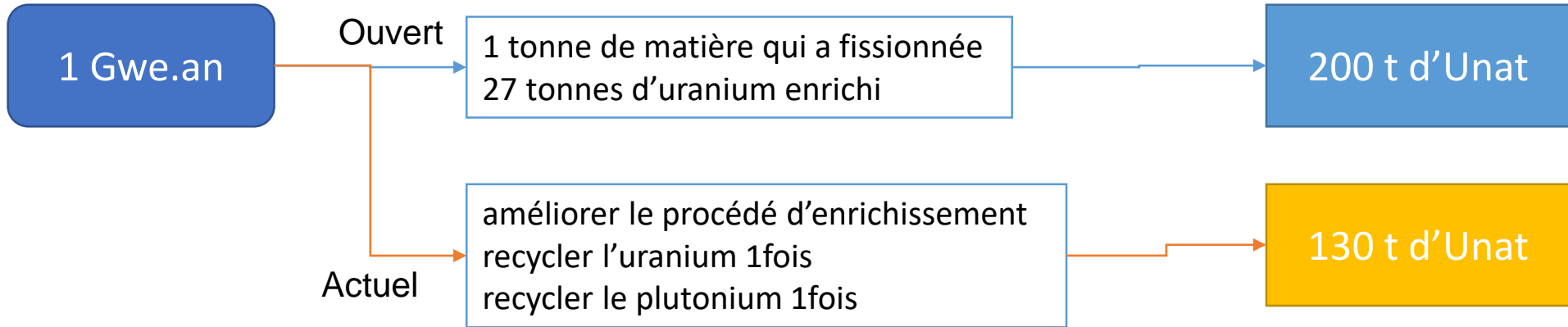
On concentre la **radiotoxicité dans les Mox usés** en vue de **valoriser le plutonium** 'plus tard'

- Mais ils deviendraient des déchets si l'on a pas besoin d'économiser l'uranium avec les réacteurs régénérateurs
- *L'économie d'uranium n'est nécessaire que s'il y a des tensions sur les ressources naturelles*

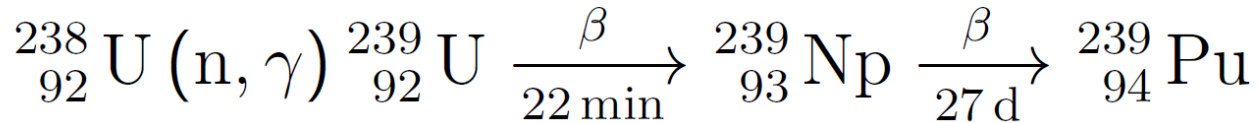


Recyclage et ressources

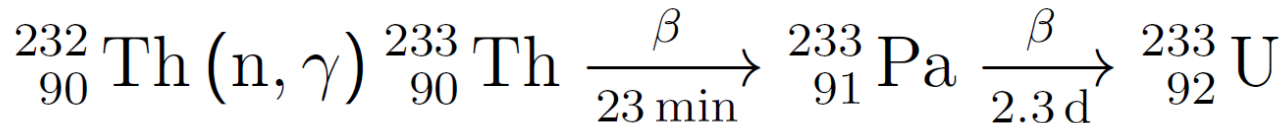
Cycle traditionnel : *Basé sur l'utilisation de l'²³⁵U (0,7% de l'uranium naturel)*



Il est possible d'utiliser l'ensemble de l'uranium en optimisant la production de plutonium



Régénération : masse de plutonium dans le réacteur constante



1 t d'Unat

Dans les deux cas, il « suffit » d'avoir la matière fissile au démarrage pour fonctionner « indéfiniment » (ressources en fertile : qqes 1000 ans)

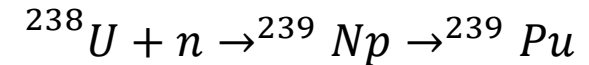


1. *Contexte: Une source d'énergie très discutée*
2. *Principes physiques de l'énergie nucléaire*
3. *Les déchets nucléaires*
4. *Recyclage et ressources en uranium naturel*
5. **Gen 4 et Transmutation**



Gen 4 et Transmutation

- 2001 : forum international Génération IV
 - Maturité technique vers 2030
 - Amélioration la sûreté nucléaire
 - Diminution du risque de prolifération nucléaire
 - **Incinération des stocks de plutonium**
 - Minimisation des déchets nucléaires
 - **Recyclage des actinides issus des réactions nucléaires**
 - Economie des ressources naturelles**
 - Diminution des coûts
 - Autres usages que la production d'électricité,
 - Hydrogène, eau potable, chaleur
 - 6 concepts proposés :
 - Sodium Cooled Fast Reactor (SFR ou RNR-Na) ;
SuperPhenix, ASTRID
 - Gaz Cooled Fast Reactor (GFR)
 - Lead Cooled Fast Reactor (LFR)
 - Super Critical Water Reactor (SCWR)
 - Very High Temperature reactor (VHTR)
 - Molten Salt Reactor (MSR)
- + Accelerator Driven System (ADS) Myrrha



- **Réaction de régénération du plutonium**
- **Impose un spectre rapide**
- **Plus besoin d'uranium naturel !**

Economie de la ressource

Recyclage du plutonium (qui n'est plus un déchet)

Pourquoi pas recyclage des actinides mineurs ?



Gen 4 et Transmutation

- Ce sont les neutrons retardés qui déterminent la période des réacteurs :

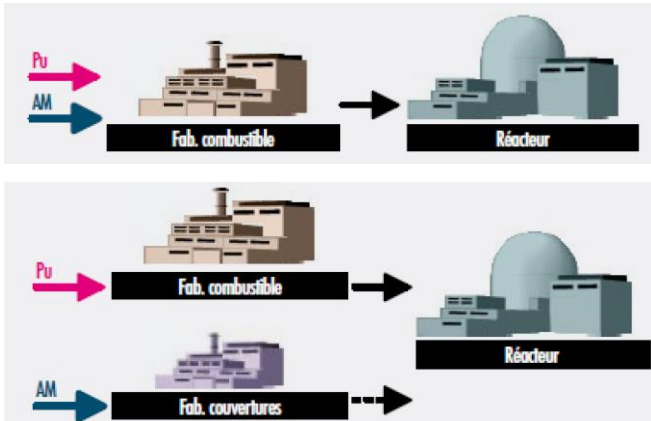
$$\Lambda = (1 - \beta)\Lambda_{\text{prompt}} + \beta \left(\Lambda_{\text{prompt}} + \frac{\ln 2}{\lambda_{PF}} \right)$$

- ➔ Les neutrons retardés sont très faibles en proportion mais imposent le temps entre 2 générations (et donc la vitesse de réaction nécessaire au contrôle)
- ➔ Ils dépendent des rendements de fissions et donc du noyau fissionnant

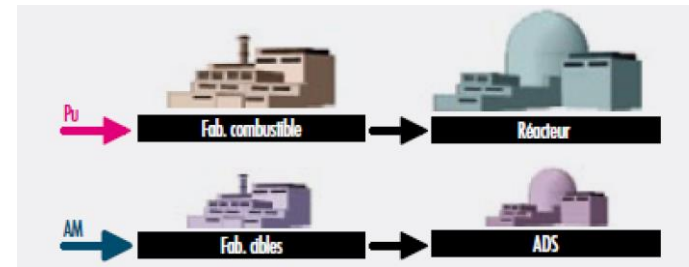
$$k_{\text{eff}} < 1 + \beta$$

- Stratégies possibles

Simple strate



Double strate



Rapport CEA (2012)

Noyau	β
^{233}U	0.27 %
^{235}U	0.65 %
^{238}U	1.48 %
^{239}Pu	0.21 %
^{240}Pu	0.27 %
^{241}Pu	0.49 %
^{241}Am	0.14 %
^{242}Am	0.24 %
^{243}Am	0.23 %
^{244}Cm	0.13 %
^{245}Cm	0.18 %

- La difficulté de construire des combustibles chargés en actinides mineurs
 - ➔ Fort dégagement d'Hélium (décroissance alpha) et tenue des matériaux
 - ➔ Dosant dans le cycle (irradiation neutron, gamma et dégagement de chaleur)



Gen 4 et Transmutation

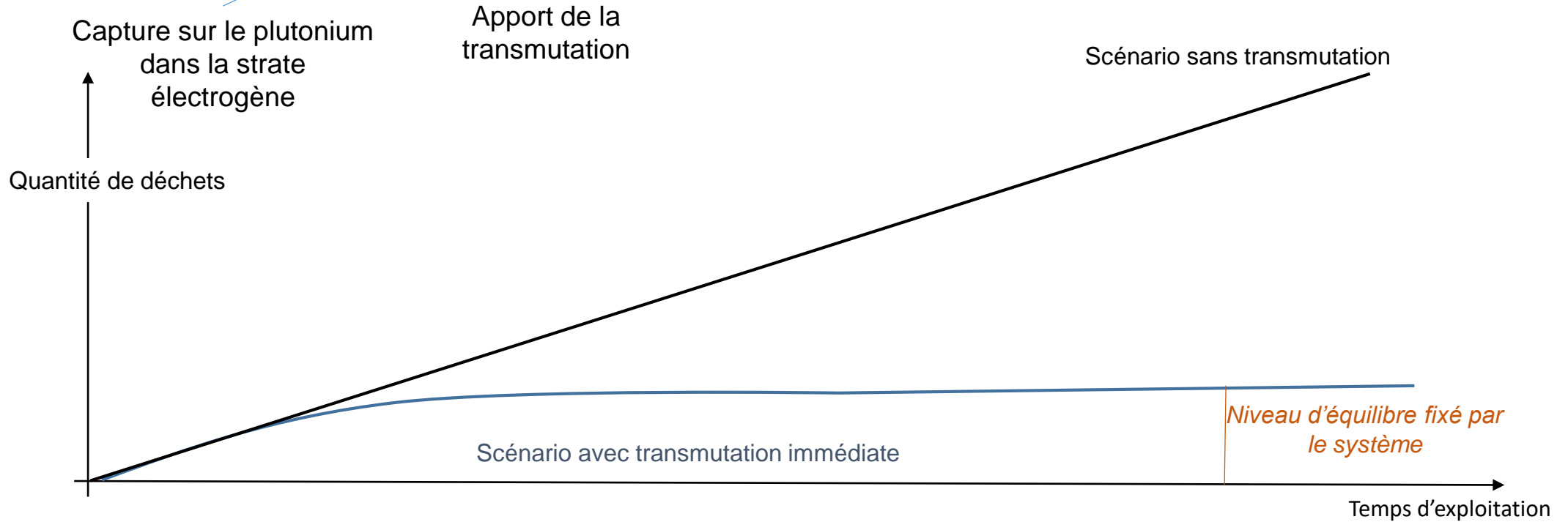
On ne fait pas « disparaître les déchets » : on amène les isotopes recyclés à l'équilibre

$$\frac{dN}{dt} = \underbrace{\text{Production}} - \underbrace{\text{Disparition}}$$

→

$$N(t) = \frac{P}{\sigma_a \phi} (1 - e^{-\sigma_a \phi t})$$

L'équilibre est donnée par le taux de disparition (donc le flux de neutrons)





Gen 4 et Transmutation

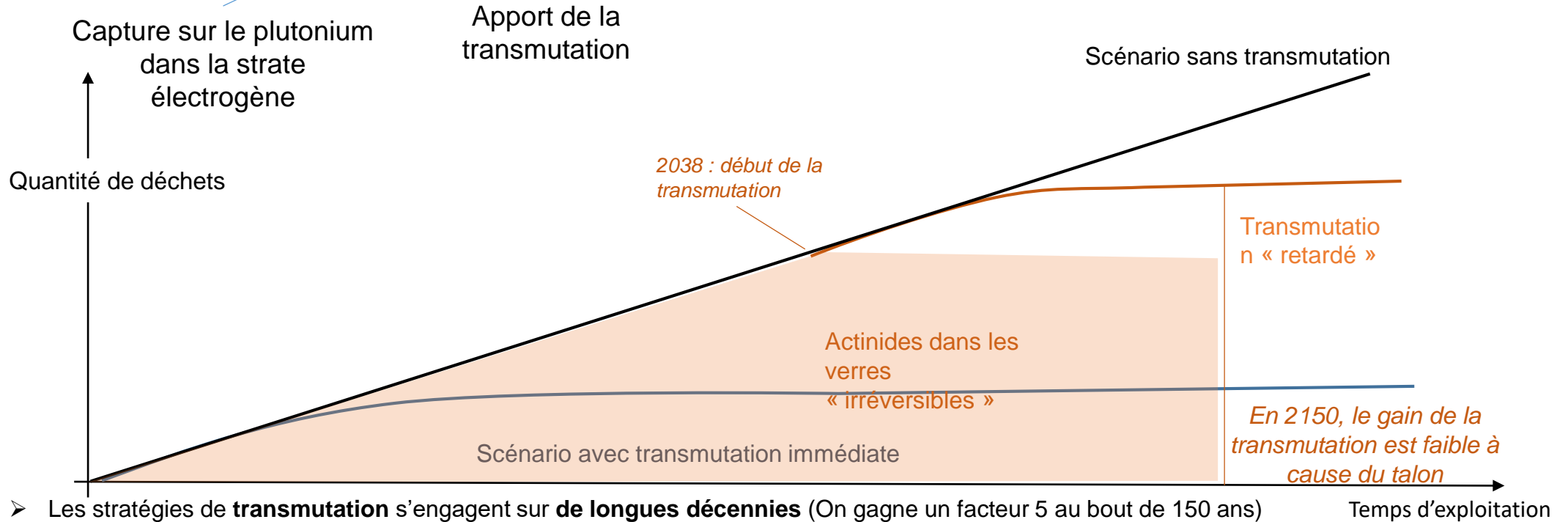
On ne fait pas « disparaître les déchets » : on amène les isotopes recyclés à l'équilibre

$$\frac{dN}{dt} = \underbrace{\text{Production}} - \underbrace{\text{Disparition}}$$

→

$$N(t) = \frac{P}{\sigma_a \phi} (1 - e^{-\sigma_a \phi t})$$

L'équilibre est donnée par le taux de disparition (donc le flux de neutrons)



- Les stratégies de **transmutation** s'engagent sur **de longues décennies** (On gagne un facteur 5 au bout de 150 ans)
- Pour les **PF-VL**, l'incinération **est peu efficace** (matériaux, temps d'irradiation, impact fort dans le cycle)
- Le « **talon irréversible** » **implique** la mise en œuvre de la **transmutation sur des temps très long**
- Peut-on remettre en cause l'irréversibilité des verres?

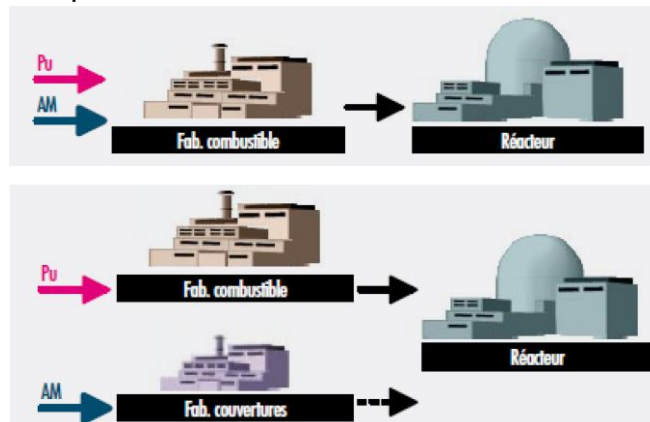


Quels systèmes pour la transmutation ?

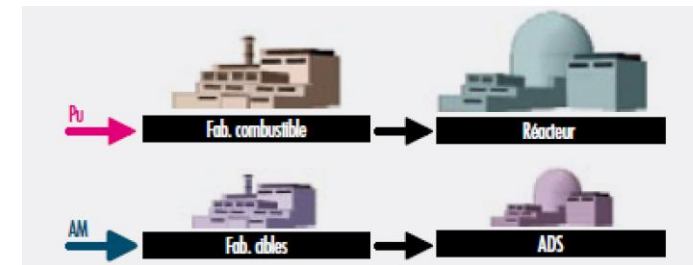
En Europe, projets :

- Sodium Cooled Fast Reactor (SFR ou RNR-Na) ; SuperPhenix, ASTRID, Hexana, Otrera
- Molten Salt Fast Reactor (MSFR) : Naaera, ISAC, Stellaria
- Accelerator Driven System (ADS) : Myrrha

Simple strate avec RNR-Na



Double strate avec MSFR ou ADS



Que permettent ces incinérateurs de déchets (MSFR, ADS) ?



1. *Contexte: Une source d'énergie très discutée*
2. *Principes physiques de l'énergie nucléaire*
3. *Les déchets nucléaires*
4. *Recyclage et ressources en uranium naturel*
5. **Gen 4 et Transmutation**

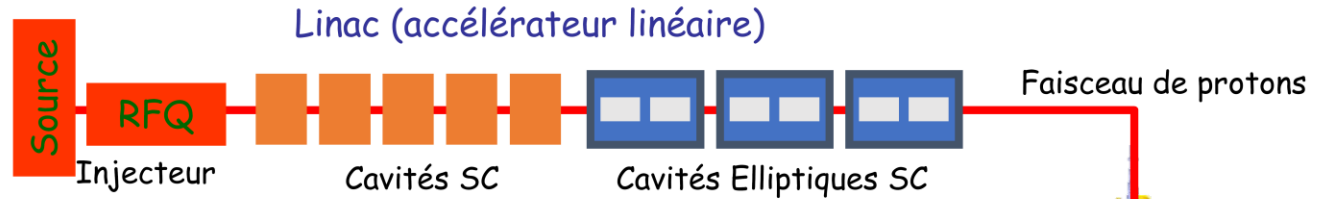


Gen 4 et Transmutation : ADS

- Deuxième strate : dédié à l'incinération des actinides mineurs
 - **Sous critique** à cause des neutrons retardés
 - Besoin d'une source de neutrons externe pour alimenter la réaction en chaîne

Accélérateur

- pour quantité optimale de **neutrons sources**: cible de plomb et **protons** incidents de l'ordre de **1 GeV**;
- **accélérateur linéaire** (LINAC) privilégié (plus de souplesse dans l'ajustement de l'énergie).

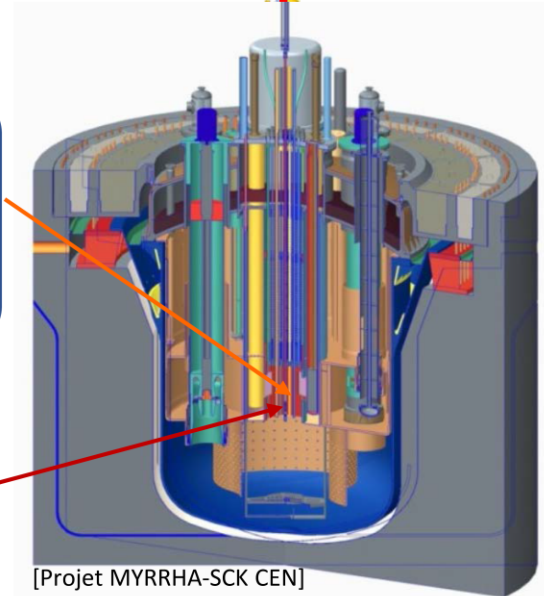


Cible de spallation

- **métal lourd** pour maximiser la production de neutrons.
- refroidie pour évacuer la chaleur déposée par le faisceau et la spallation (**cible liquide**).
- **au centre du massif combustible** pour optimiser le couplage
- **séparée physiquement de l'accélérateur** (par fenêtre ou autre).

Coeur sous-critique

- Coeur sous-critique à neutrons **rapides**, donc refroidi par un fluide qui ne ralentit pas les neutrons (métal liquide).



➔ Transmutation à l'œuvre **dans le réacteur (quelle que soit la source de neutrons)**



Gen 4 et Transmutation : ADS

- Même si sous-critique, un ADS reste un système multiplicateur
→ Après l'injection d'un neutron de la source, on a :

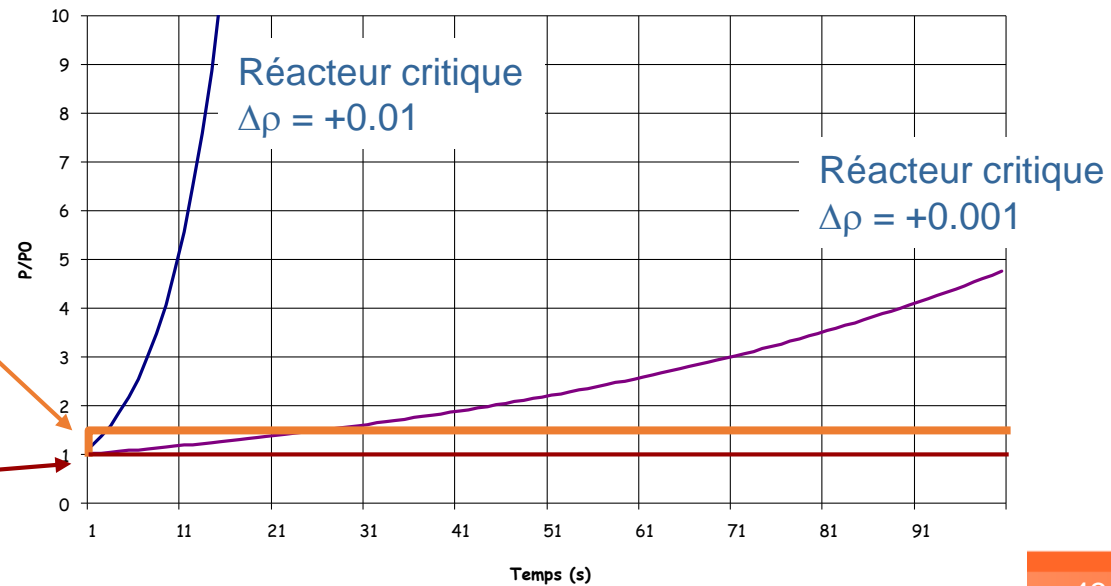
$$N = 1 + \underbrace{1 \times k_{eff}}_{\text{generation 1}} + \underbrace{1 \times k_{eff} \times k_{eff}}_{\text{generation 2}} + \underbrace{1 \times k_{eff} \times k_{eff} \times k_{eff}}_{\text{generation 3}} + \dots \rightarrow N = \frac{1}{1 - k_{eff}} > 1$$

- $k_{eff} = 0,95 \Rightarrow N = 19$; $k_{eff} = 0,97 \Rightarrow N = 33$; $k_{eff} = 1 \Rightarrow N \rightarrow \infty$ (OK par définition de la réaction en chaîne auto-entretenu)

- On cherche à se rapprocher de la criticité sans jamais l'atteindre
→ Difficulté pour mesurer la réactivité d'un système !
→ On pilote avec l'accélérateur
→ => grosse R&D accélérateur

ADS k=0,97
 $\Delta\rho = +0.01$
 $\Delta P = +50\%$

ADS k=0,97
 $\Delta\rho = +0.001$
 $\Delta P = +3\%$





Gen 4 et Transmutation : ADS

→ Origine :

- Dans les années 50, dès les premiers accélérateurs, on pense à fabriquer de l' ^{233}U à partir de thorium. Concept de « Spallator » ou « accelerator breeder » au Canada (Chalk River)

→ Dans les années 1990 :

- Furukawa - Japon (université de Tokai) : accélérateur haute intensité couplé à un réacteur à sels fondus pour surgénération de l' ^{233}U « Accelerator Molten Salt Breeder »
- Bowman : ajout de l'objectif de la « transmutation » des transuraniens et des PF à vie longue
- Rubbia : Synchrotron couplé à une cible de thorium refroidit au plomb

→ Depuis plusieurs projets dans le monde :

- MYRRHA porté par le SCK CEN
 - *Etape proto-industrielle de 100 MWth*
 - *Combustible MOX (pas d'actinides mineurs dans un premier temps)*
 - *Caloporteur Pb-Bi*
 - *Faisceau de protons 4 mA à 600 MeV*
- Concept industriel : EFIT (European Facility for Industrial Transmutation)
 - 400 à 600 MWth
 - 20 mA à 800 MeV
 - Puissance limitée par le point chaud introduit par le faisceau



Gen 4 et Transmutation : ADS

→ Rappel de l'objectif : stabiliser la production d'actinides mineurs

- Production annuelle du parc Français : 1.2 tonnes par an (pour environ 400 TWh produit)
- ADS de type EFIT = 400 MWth (soit 2.45 TWh /an)
 - 42 kg par TWh soit environ 103 kg par an et par réacteur

→ **~12 EFIT pour le parc Français !**

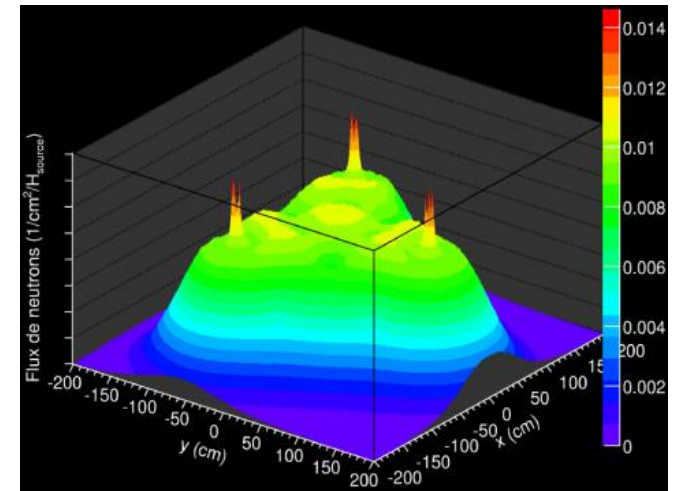
→ Ce nombre peut être réduit en augmentant la puissance de chaque machine

- Faisceau plus intense (quelles limites pour le courant)
- Multi-cible pour la nappe de puissance

➤ Multiple Spallation Target (concept MUST)

- ~50 to 70 mA sur 3 cibles
- 1.4 GWth

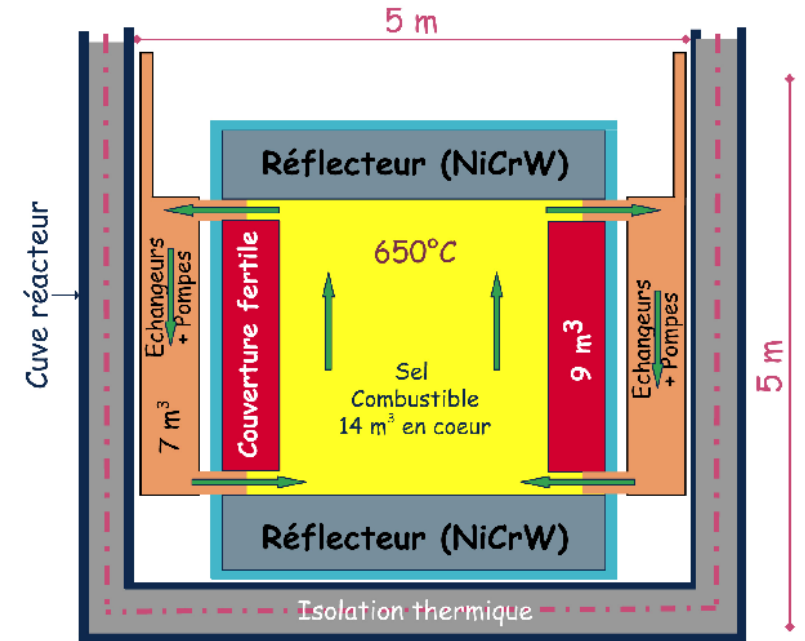
→ ~5 MUST pour le parc !



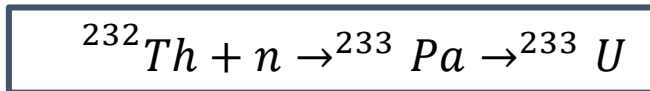


Gen 4 et Transmutation : Sels fondus

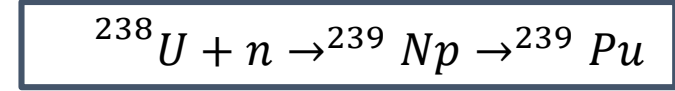
- Combustible = Caloporteur
 - Circulation du combustible qui traverse le cœur (fission) vers les échangeurs de chaleurs
- Avantages : l'énergie est déposée directement dans le caloporteur
 - On gagne en inertie thermique
 - Pas de dommage thermique sur les matériaux dans le cœur si excursion de réactivité
- Caractéristique des sels :
 - Transparents aux neutrons
 - Température de fusion acceptable
 - Température d'ébullition élevée
 - Bonnes propriétés thermiques (c_p et λ)
 - Solubilité des actinides élevée



Cycle thorium



Cycle uranium





Gen 4 et Transmutation : Sels fondus

- 1954 : ARE (Aircraft Reactor Experiment)
 - Propulsion aéronautique (réacteur compact)
 - $\text{NaF-ZrF}_4\text{-UF}_4$
 - Puissance de 2,5 MWth
 - Production de 96 MWh
- 1965 - 1969 : MSRE (Molten Salt Reactor Experiment)
 - $\text{LiF-BeF}_2\text{-ZrF}_4\text{-UF}_4$
 - 7,4 MW
 - 5 ans de production pour ~93 GWh produits
 - Fissile : U5, U3 et Pu9 (pas de thorium !)
- Puis de nombreux projets papiers :
 - MSBR (2,5GW) – successeur du MSRE – ORNL (années 1970)
 - TASSE – CEA (années 1990)
 - REBUS – EDF (années 1990)
 - MOSART – Kotchakov Institute
 - MSFR – CNRS

D. Heuer, ECOCLIM 2018

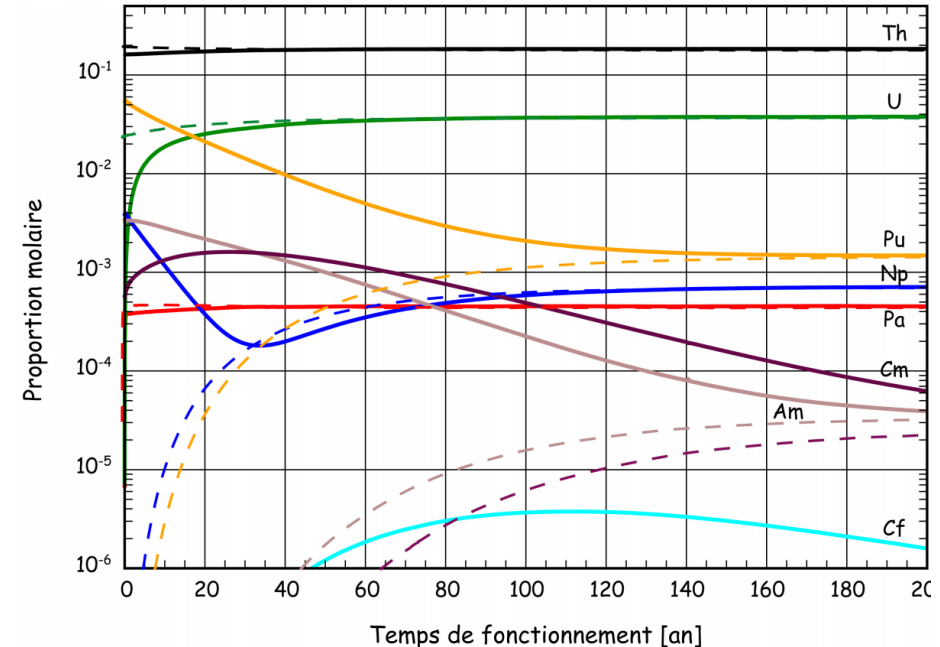
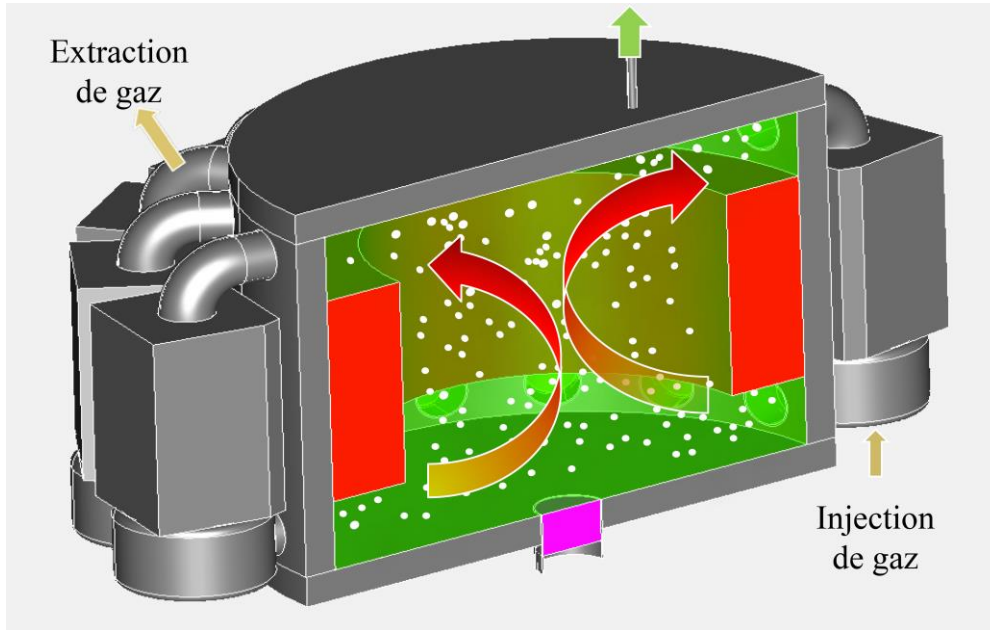




Gen 4 et Transmutation : Sels fondus

- RSF permet un retraitement en ligne
 - Système de bullage pour extraire l'ensemble des éléments non solubles
 - Extraction régulière (~qq dizaines de litres tous les jours) pour extraction pyrochimique

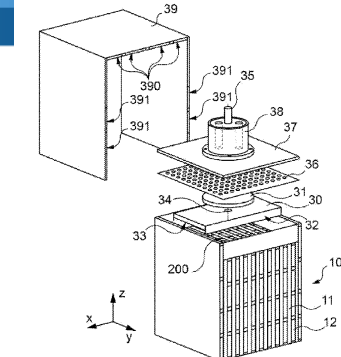
Fluoruration puis extraction électrochimique liquide/liquide pour séparer les actinides des lanthanides



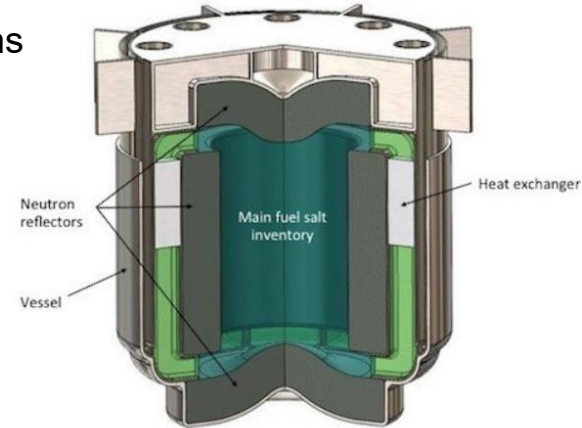
HDR E. Merle



Gen 4 et Transmutation : Sels fondus



- Regain d'intérêt en France
 - Orano
 - *Projet Installation d'un RSF à la Hague*
 - start-ups du nucléaire
 - *SMR aux sels fondus*
- USA :
 - Terrapower prévoit un démonstrateur de RSF chlorure d'ici 5 ans
 - *Spectre rapide*
 - *Prévu à Oak Ridge*
 - *Objectif : démonstrateur de 1100 MWth à l'horizon 2030*
 - *Financé par le DoE (30 M\$ pour l'étape préliminaire)*
 - Etude papier + faisabilité des technologies des sels
 - *Contrôle chimique redox (corrosion)*
 - *Synthèses des sels*
 - *Circulateurs + échangeurs de chaleur*
 - *Pas encore de manipulation de sels actifs*
- Chine
 - TMSR-LF1
 - *Construction en cours d'une maquette de 2MWth*
 - *LiF-BeF₂-ThF₄-UF₄*
 - *Très peu d'informations fiables*



Concept intéressant sur le papier...
...Mais attention aux effets d'annonces.
→ Tout est à repenser : pilotage, sûreté, matériaux, chimie,...



Questions sur le nucléaire, ses possibilités et ses limites?