

# Energie(s) nucléaire(s) du futur

-

*Les enjeux de recherches et l'intérêt d'une approche académique*

Xavier Doligez, IJC-lab Orsay

Rencontres de physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit

*11-22 juillet 2022* - promotion Richard Feynman

# Introduction : L'énergie nucléaire – une « application » naturelle de la physique nucléaire

Pourquoi un exposé sur l'énergie nucléaire ?

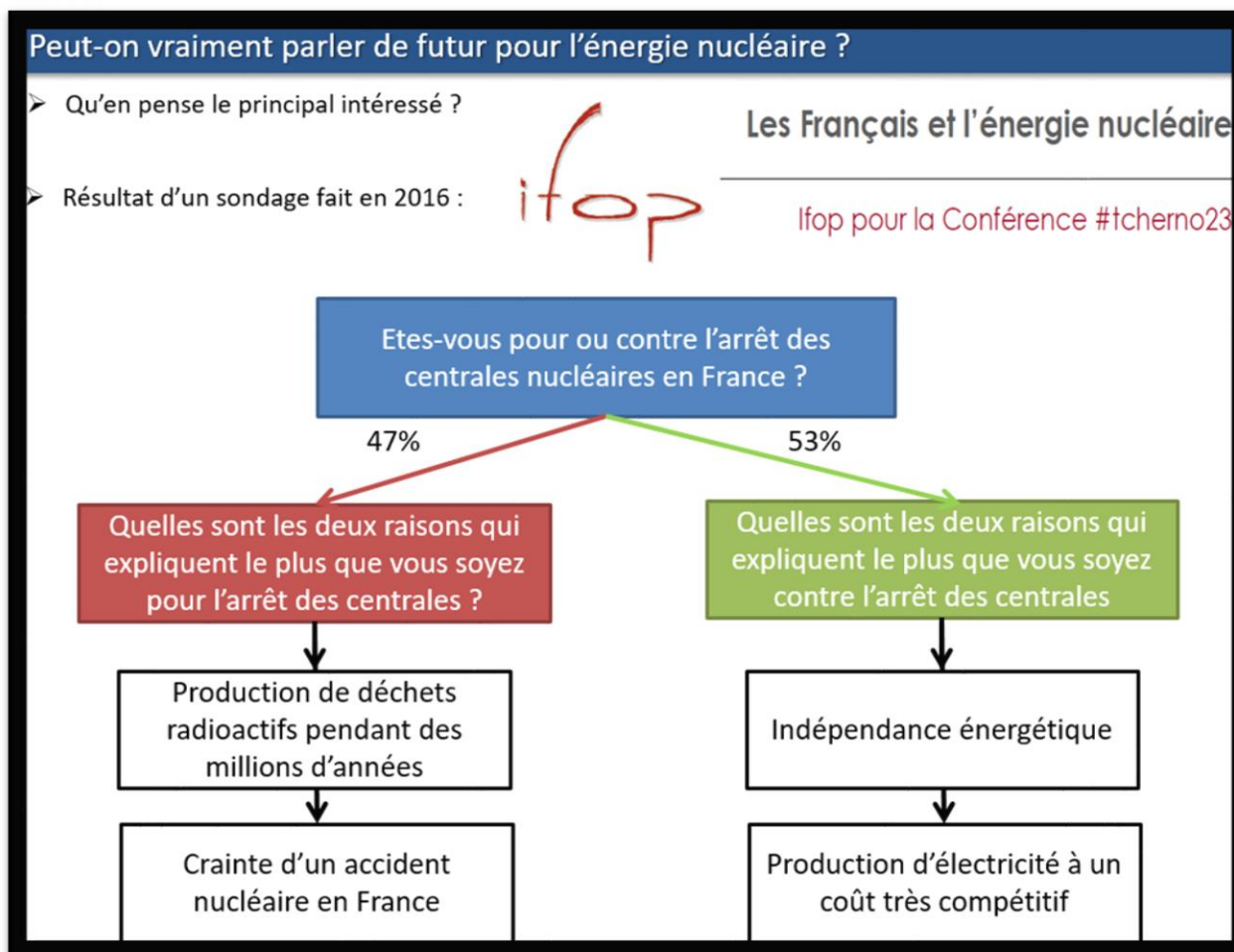


➤ Un petit sondage pour commencer :

« Vous personnellement, êtes-vous favorable ou opposé à la production d'énergie nucléaire en France ? »

→ Réponses : 75% des Français favorables (en septembre 2022)

65% pour la construction de nouveaux réacteurs



➤ En 2016 :

En quoi est-ce une affaire de physicien ?

1. La fission : un processus « nucléaire »
2. Le contrôle des réacteurs
3. La recyclabilité des matières et les questions de ressources

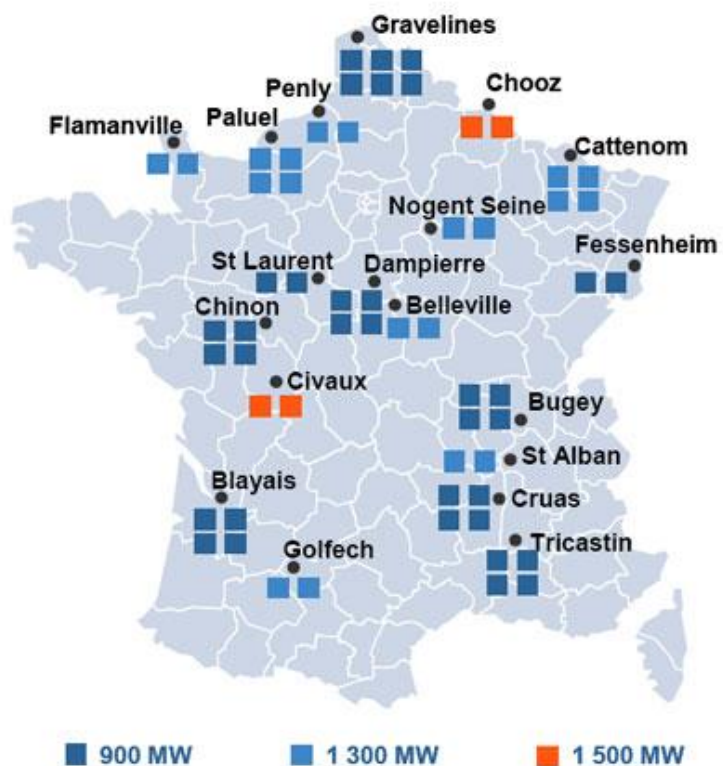
# Introduction : L'énergie nucléaire – une « application » naturelle de la physique nucléaire

La fission : une manifestation de la formidable quantité d'énergie contenue dans les noyaux

- Université Paris - Saclay : un lieu chargé d'histoire pour parler d'énergie :
  - Site d'Orsay :
    - 1956 : Irène et Frédéric Joliot fondent l'IPNO en 1956
  
  - Site du CEA :
    - 1948 : divergence de la pile ZOE à Fontenay
    - 1952 : divergence de EL2 (« ZOE-2 ») à Saclay
    - 11 « piles » créés par la suite (entre 1956 et 1980)
  
- Depuis l'énergie nucléaire suscite des débats sociétaux
  - 1971 : Première manifestation contre le nucléaire à Fessenheim
  - 1973 : premier choc pétrolier
    - 1974 : Plan Messmer
    - 1975 : Abandon du projet Erdeven suite à une contestation
    - 1977 : Démarrage de Fessenheim
  
- 2022 un tournant dans l'histoire du nucléaire : vers un nouveau plan Messmer ?

# Introduction : Le nucléaire dans la transition énergétique

## Panorama national et mondial actuel



- 56 réacteurs (18 sites)
- 1 seule technologie : **REP** (Réacteurs à Eau sous Pression)
- 1 tranche en construction (FA3)
- **~70%** de l'électricité française



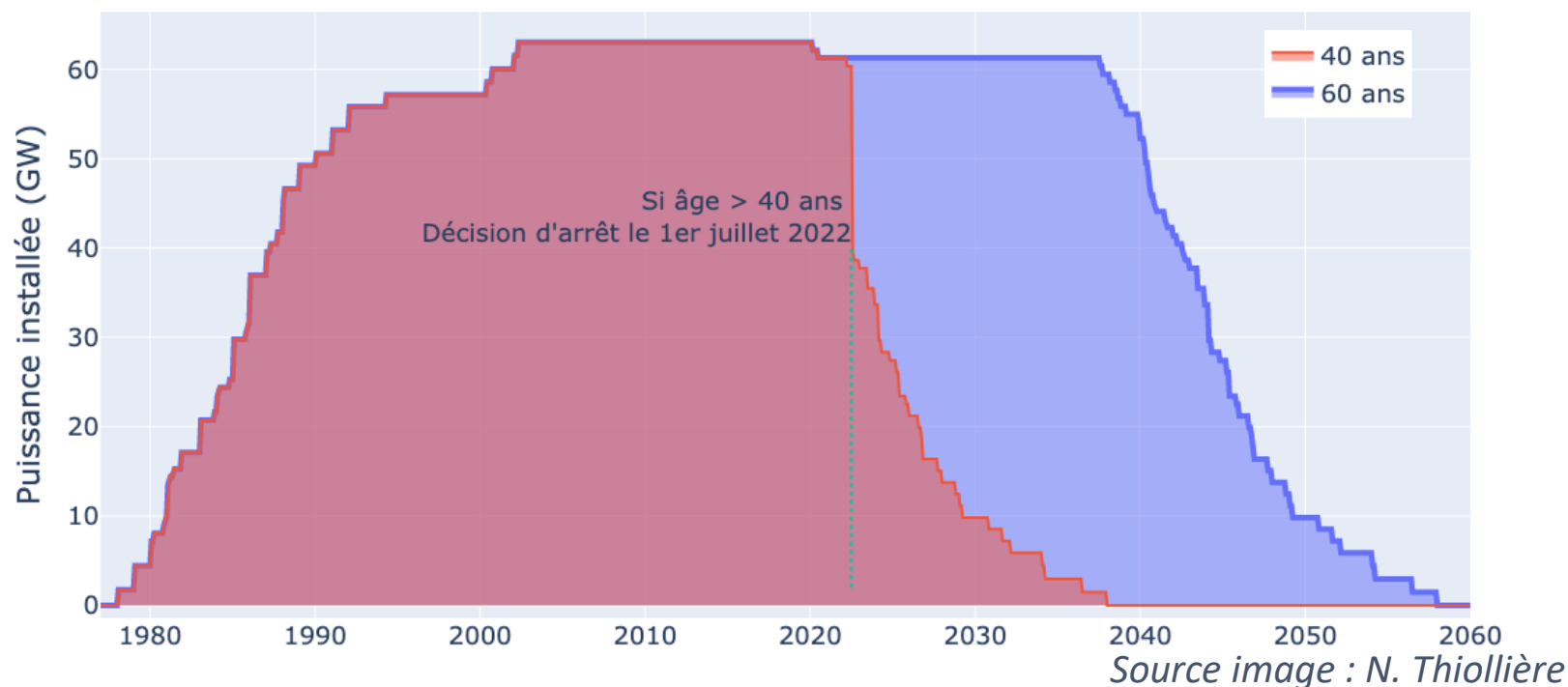
- ~450 réacteurs de puissance  
**265 REP, 92 REB, 45 eau lourde (CANDU),...**
- 57 tranches en construction
- **~10%** de l'électricité mondiale

En France (à la différence de l'internationale), la transition énergétique implique nécessairement une réflexion sur la place du nucléaire

# Introduction : Le nucléaire dans la transition énergétique

## L'évolution du parc

- La France a accéléré son programme nucléaire (Plan Messmer) à la suite du premier choc pétrolier
  - Construction de 6 à 7 nouveaux réacteurs nucléaires par an
  - **40 ans plus tard : fermeture de 6 à 7 réacteurs nucléaires par an !**



- Les années **2025/2050** sont **clefs** pour le nucléaire (effectuée dans le cadre de la transition énergétique) :
  - Sollicitation des réacteurs pour le **suivi de charge**
  - *Extension de la durée de vie des réacteurs*
  - Renouvellement du parc
  - Renouvellement des installations du cycle : La Hague (retraitement) et MELOX (fabrication)

- Le déploiement des **réacteurs à neutrons rapides** (génération IV) est repoussé **après 2080** (décision d'arrêt d'ASTRID en 2019)

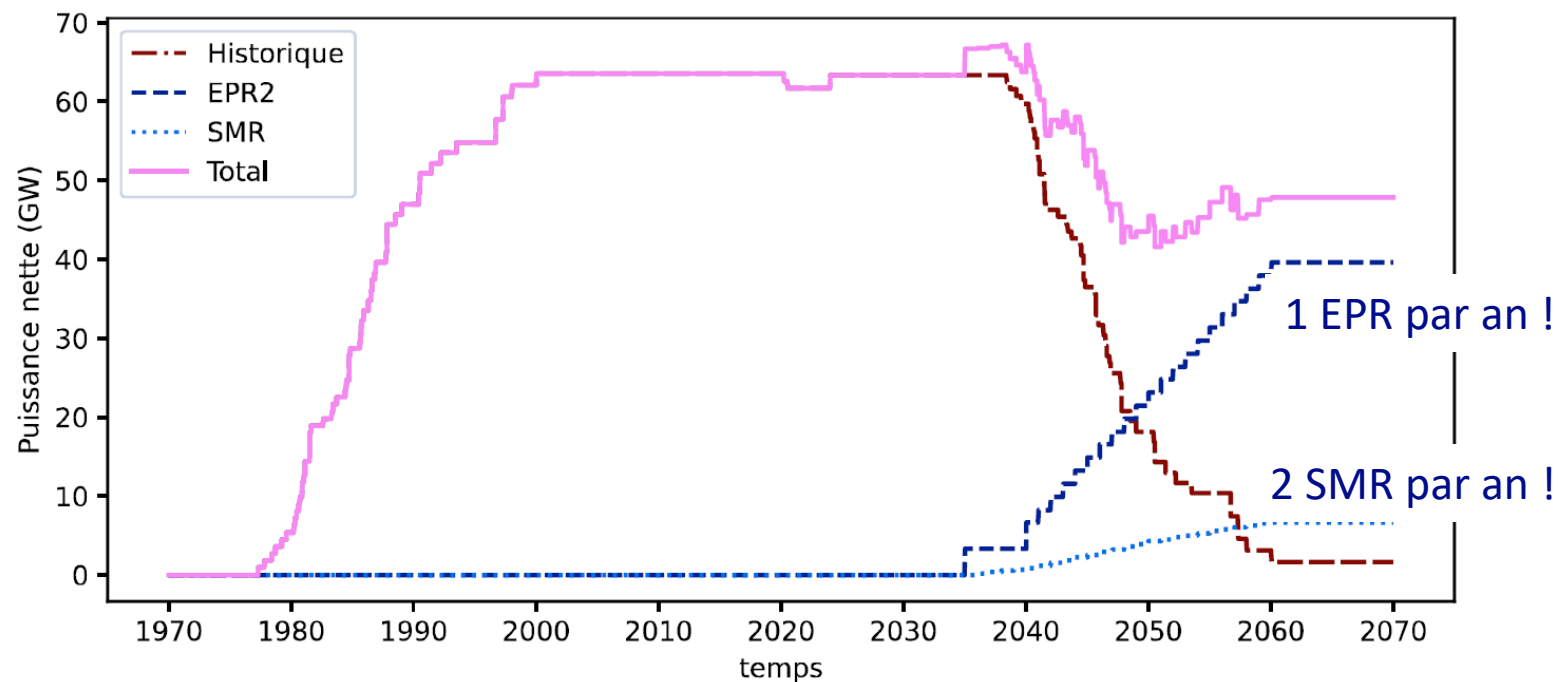
### Futurs énergétiques 2050

Principaux résultats

Octobre 2021

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

- Complémentarité ENR et Nucléaire
- Intérêt du nucléaire pour le pilotage (fermeture des centrales thermiques à flamme qui permettent le suivi de charge)
- Appel au « réalisme » à propos du développement de nouvelles technologies et aux déploiements de nouvelle source de production
- Pas (ou très peu) de mentions des problématiques « combustibles »



# Introduction : Le processus de décision

Un cadre législatif « strict »



- Réduire les **émissions de GES de 40%** entre 1990 et 2030
- Réduire la **consommation énergétique finale de 50%** entre 2012 et 2050
- Réduire la **consommation d'énergie primaire fossile de 30%** entre 2012 et 2030
- Porter la part du **nucléaire à 50%** à l'horizon **2025**
- 100% de bâtiment basse consommation d'ici 2050
- Lutter contre la **précarité énergétique**
- Affirmer un droit à l'accès à l'énergie sans cout excessif
- Réduire de 50% la quantité de déchets mis en décharge à 2025 et **découpler la croissance économique de la consommation des matières premières**

## ➤ Moyens de mise en œuvre pratiques discutés dans différents cadres :

- Stratégie Bas Carbone (SBC)
- Programmation Pluri-annuelle de l'Énergie (**PPE**)
- Plan National de Gestion des Déchets et Matières Radioactives (**PNGMDR**)

## ➤ Définition des politiques publiques d'investissements

- Exemple de la première PPE (publié le 1<sup>er</sup> juillet 2016 et à mettre en œuvre d'ici 2023) :  
→ **+ 36 à 43 GW éolien ou PV** (17,76 GW éolien + 10,3 GW PV fin 2020 – ~ 65% en 4 ans)

Prochaine PPE en 2023 :

→ En cours de construction

→ Vers une révolution ?

# Introduction : La feuille de route du gouvernement

Essayer de rattraper le retard ?

## ➤ 2 horizons temporels pour les discussions :

Publié le 24 janvier 2023

**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**

### → Le nucléaire dans la transition énergétique

1. Sauvegarde des moyens de production électrique
  - Construction *urgente* de nouveaux réacteurs (6 EPR engagés, 8 en discussion)
  - Extension de durée de vie des réacteurs existants
  - Maintien des capacités de fabrication et de traitement des combustibles
2. Complémentarité avec les ENR
  - Pilotabilité et suivi de charge des réacteurs

### → Les nouvelles technologies de réacteurs

1. Recyclage des matières avec la technologie existante
  - Uranium et plutonium
2. Les réacteurs innovants
  - Arrivée de nouveaux acteurs *broyants et vendeurs de rêves !*





## 1. Fonctionnement des réacteurs

- ✓ Principe de la réaction en chaîne
- ✓ L'importance de la thermalisation des neutrons
- ✓ Présentation d'un REP
- ✓ L'évolution du combustible

## 2. Le cycle du combustible Français

- ✓ Bilan matière pour un cycle ouvert
- ✓ Spécificité du parc Français : le recyclage du plutonium
- ✓ Comparaison cycle ouvert/cycle MOX

## 3. Les enjeux pour le parc à l'échéance 2050

- ✓ La « crise » des piscines
- ✓ Le moxage des REP 1300
- ✓ Le Multi-recyclage du plutonium
- ✓ EPR vs EPR2
- ✓ CIGEO : projet de stockage des déchets HA-VL

## 4. Les enjeux pour le parc à l'échéance 2090

- ✓ L'épineuse question du plutonium
- ✓ Le multi-recyclage dans les systèmes rapides et la fermeture du cycle
- ✓ La transmutation des actinides mineurs
- ✓ Les RNR-Na et les autres systèmes de GEN IV

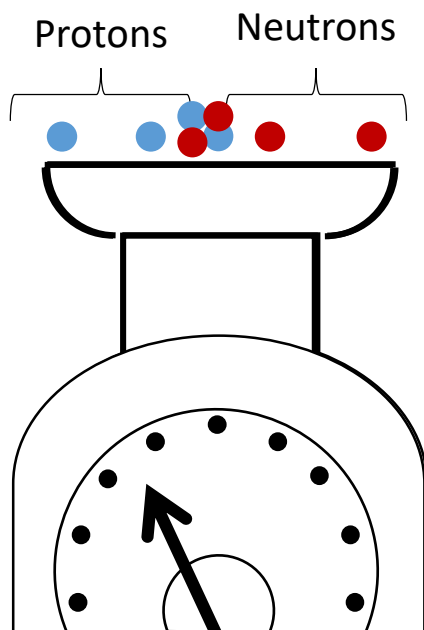
## 5. Bonus : l'importance de la modélisation neutronique

- ✓ L'équation du transport des neutrons
- ✓ Les méthodes de résolutions
- ✓ Une approche nécessairement multi-échelle

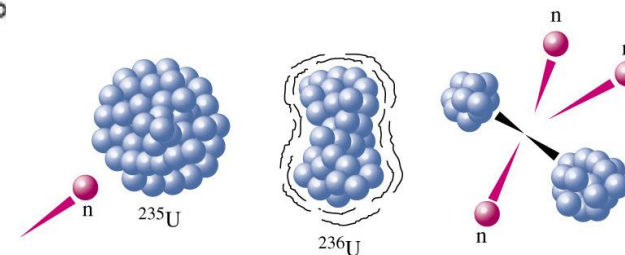
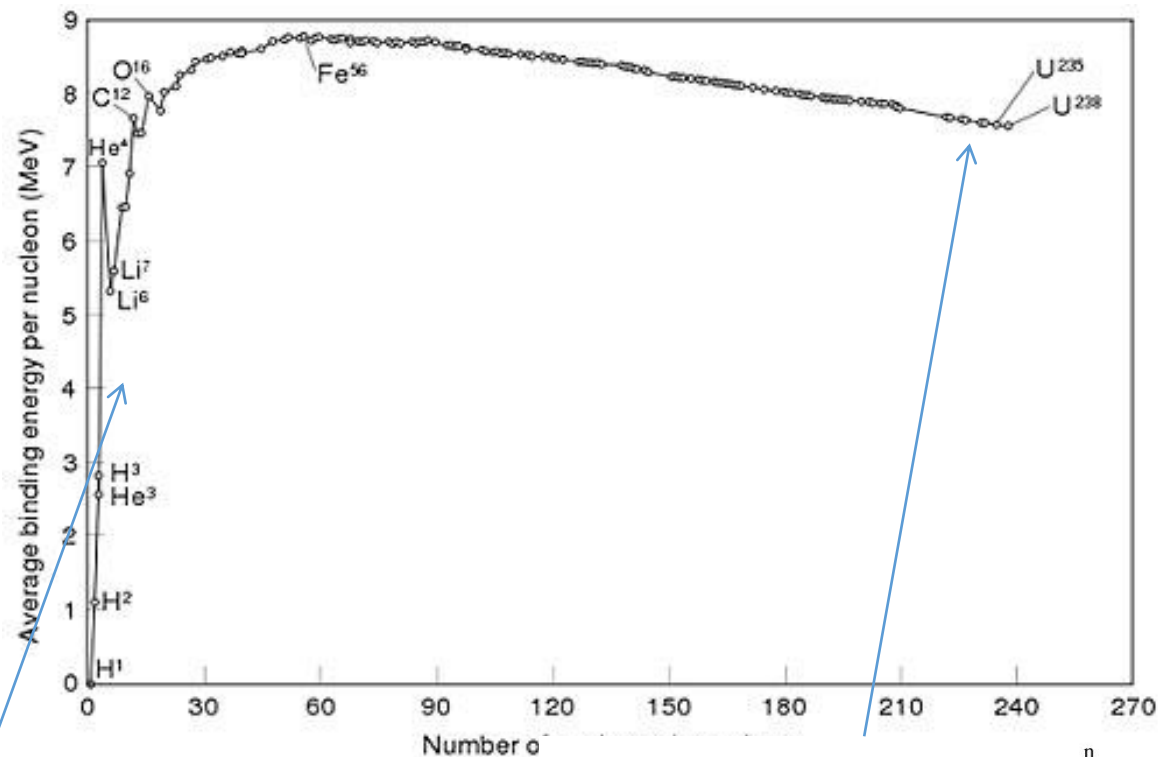
# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## L'énergie de liaison des nucléons

➤ D'où vient l'énergie dégagée par la fission ? Quels noyaux peuvent fissioner ?



Le défaut de masse quantifie la liaison des nucléons dans le noyau



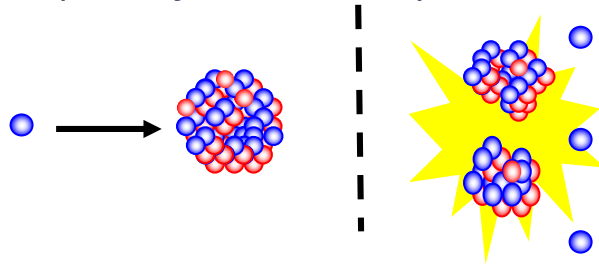
1 réaction de fission (200 MeV) =  
8 millions de réaction de combustion

# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## La fission et la réaction en chaîne

- On cherche l'énergie contenue dans les noyaux (interaction forte)

Il est possible de provoquer *la fission* des noyaux suffisamment gros en les excitant via l'absorption d'un neutron



→ On libère 2 produits de fission et 2 (ou 3) neutrons en plus d'une (très) grande quantité d'énergie (200 MeV)

- Suivant le noyau qui fissionne, la quantité d'énergie à apporter peut varier

→ **L'uranium 235 est le seul noyau présent sur terre qui peut fissionner quelque soit l'énergie cinétique du neutron**

→ **L'uranium 238 nécessite des neutrons d'énergie cinétique supérieur à 1,6 MeV**

→ 1 fission = 1 W pendant  $3.2 \cdot 10^{-11}$  seconde

→ 1 réacteur de 1 GW électrique  $\sim 10^{20}$  fissions/secondes

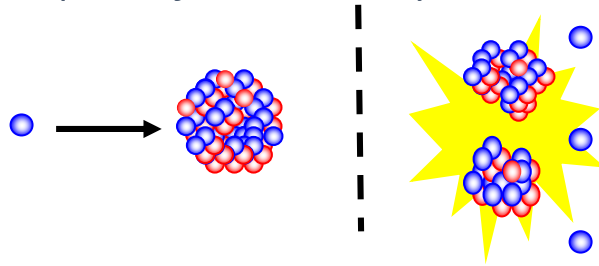
→ 1 réacteur de 1 GW électrique  $\sim 1$  tonne de matière fissionnée par an !

→ 1 réacteur de 1 GW électrique  $\sim$  électricité d'environ  $10^6$  personnes

# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

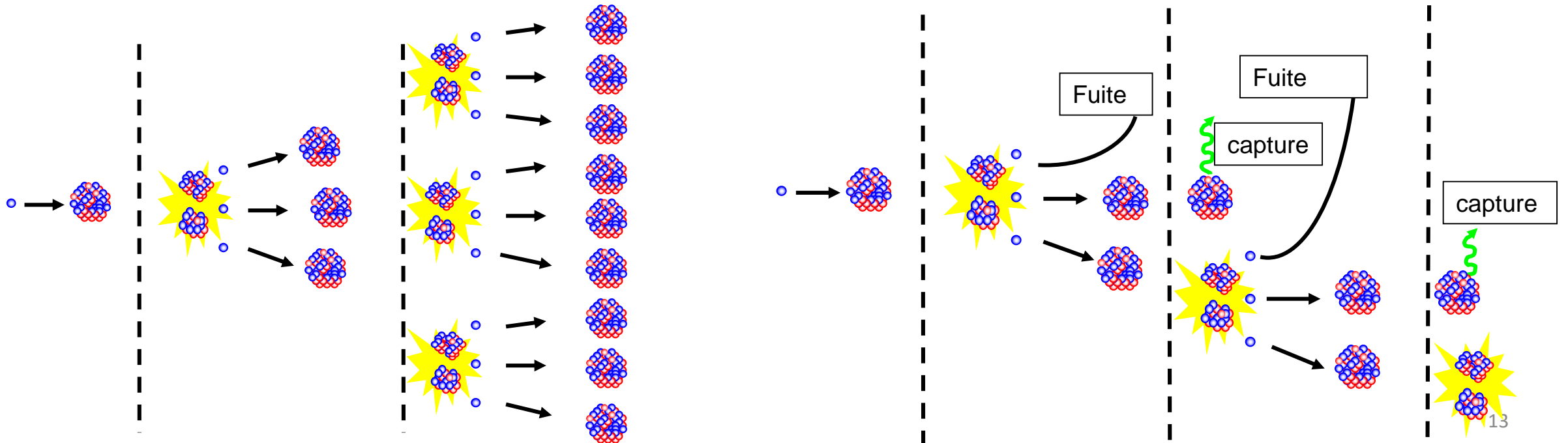
## La fission et la réaction en chaîne

- On cherche l'énergie contenue dans les noyaux (interaction forte)  
Il est possible de provoquer *la fission* des noyaux suffisamment gros en les excitant via l'absorption d'un neutron



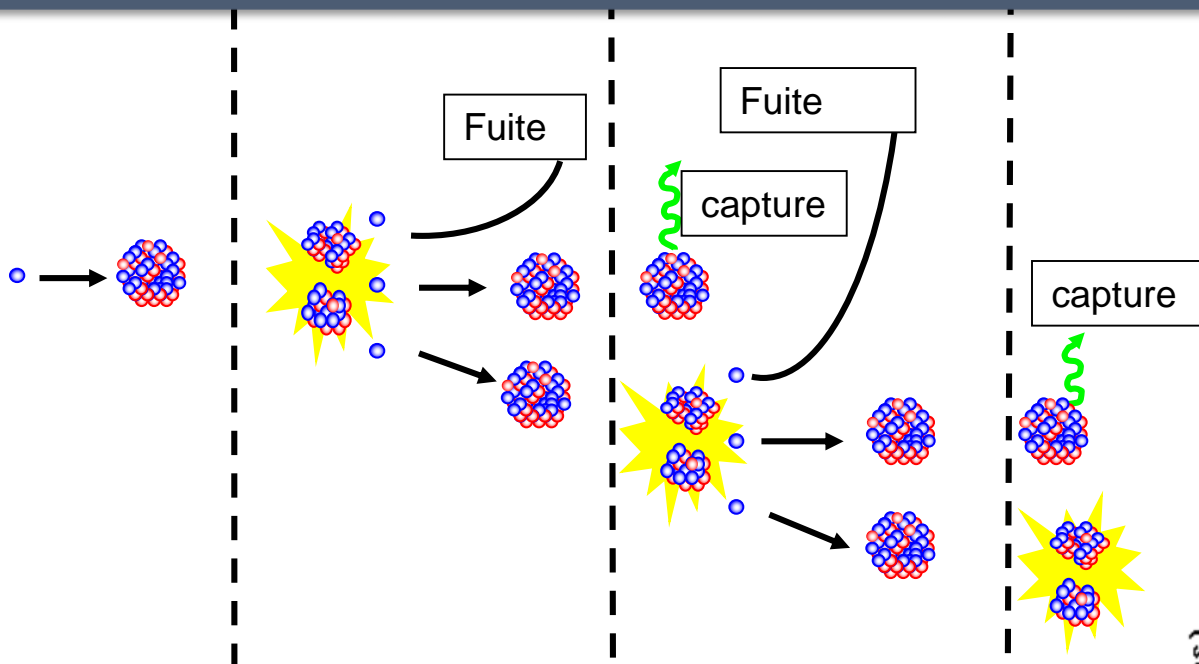
→ On libère 2 produits de fission et 2 (ou 3) neutrons en plus d'une (très) grande quantité d'énergie (200 MeV)

- Suivant le noyau qui fissionne, la quantité d'énergie à apporter peut varier
  - **L'uranium 235 est le seul noyau présent sur terre qui peut fissionner quelque soit l'énergie cinétique du neutron**
  - **L'uranium 238 nécessite des neutrons d'énergie cinétique supérieur à 1,6 MeV**



# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## Réacteurs à neutrons thermiques

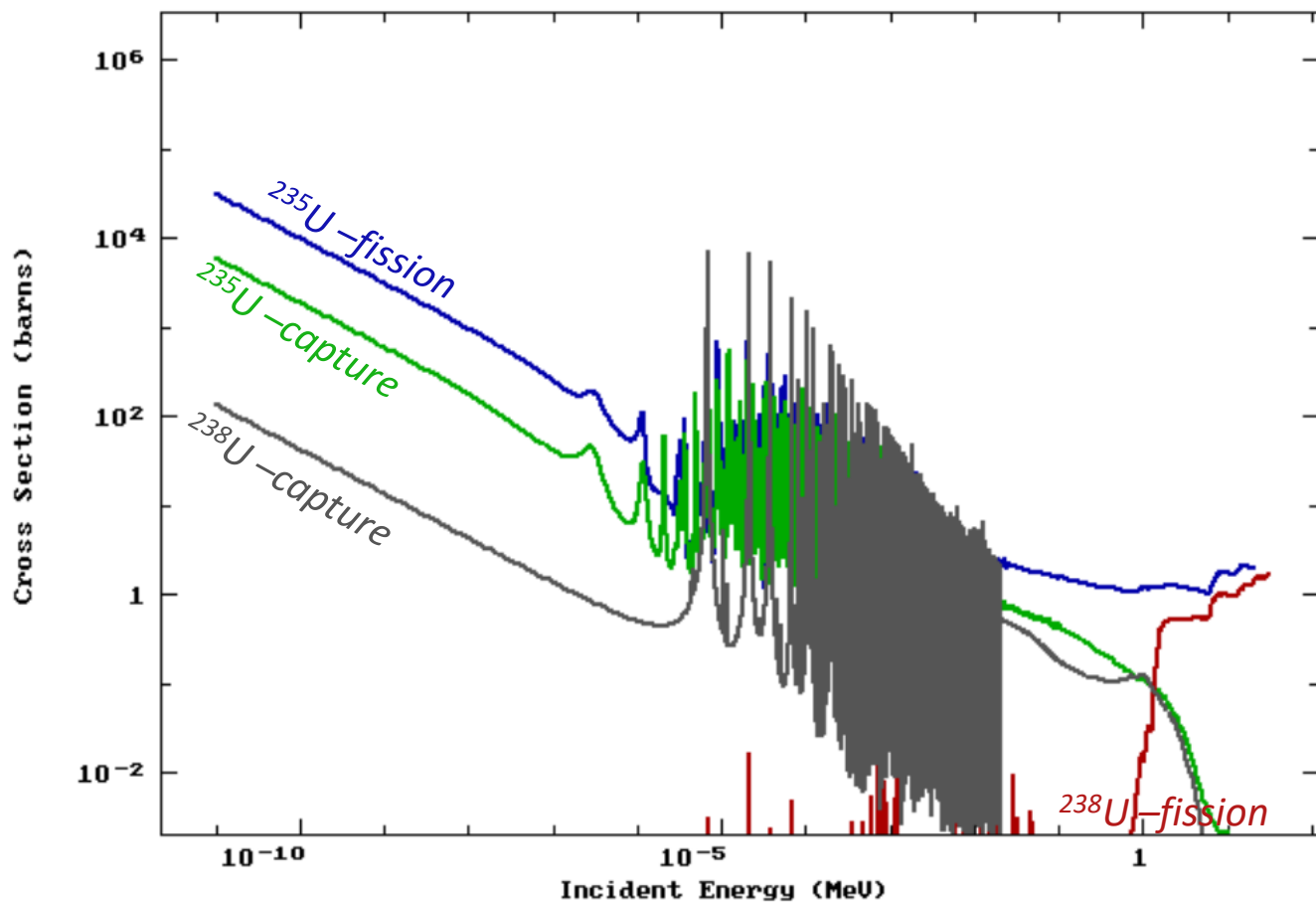


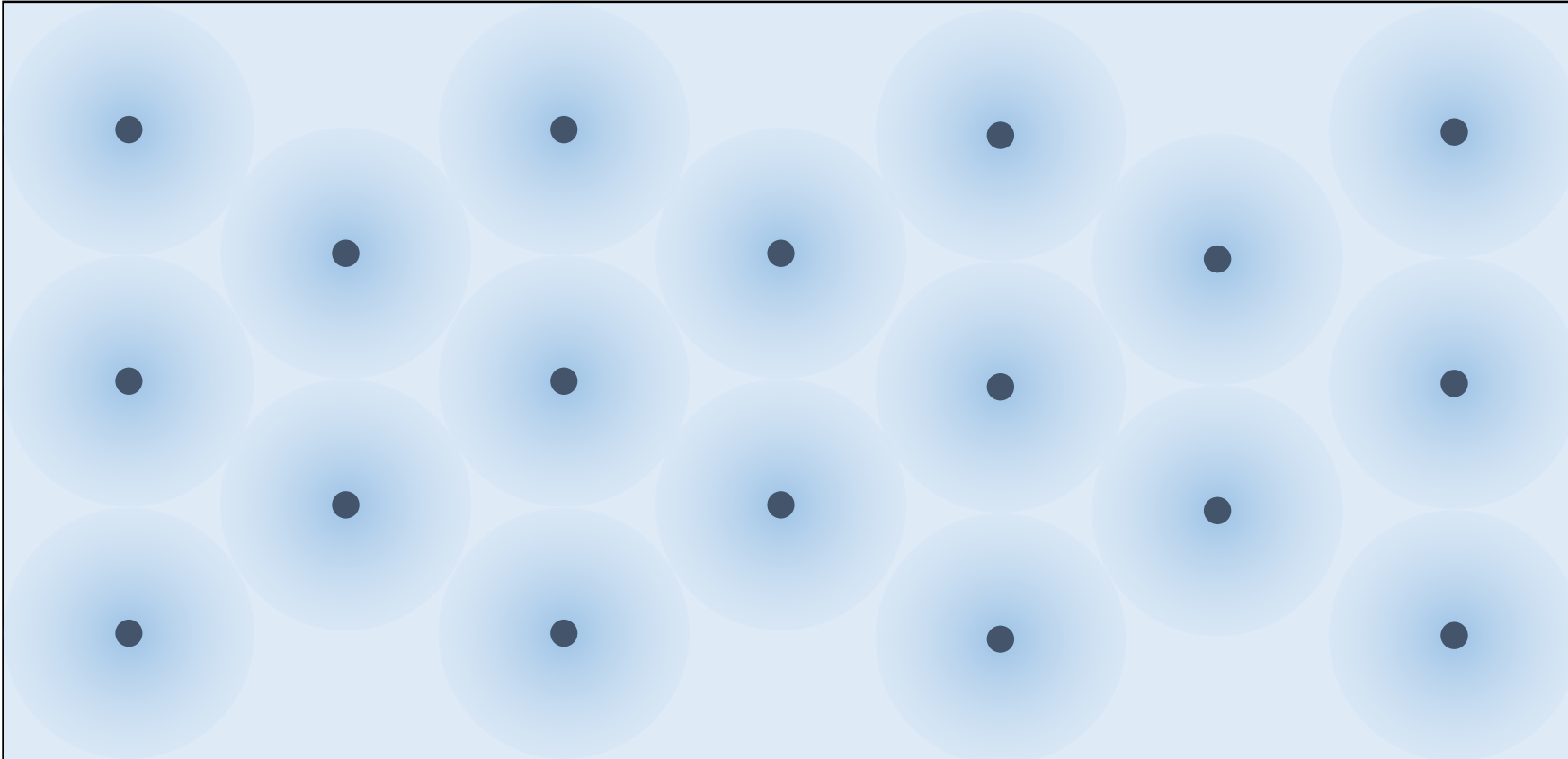
$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Nombre de fission à la génération } i+1}{\text{Nombre de fission à la génération } i}$$

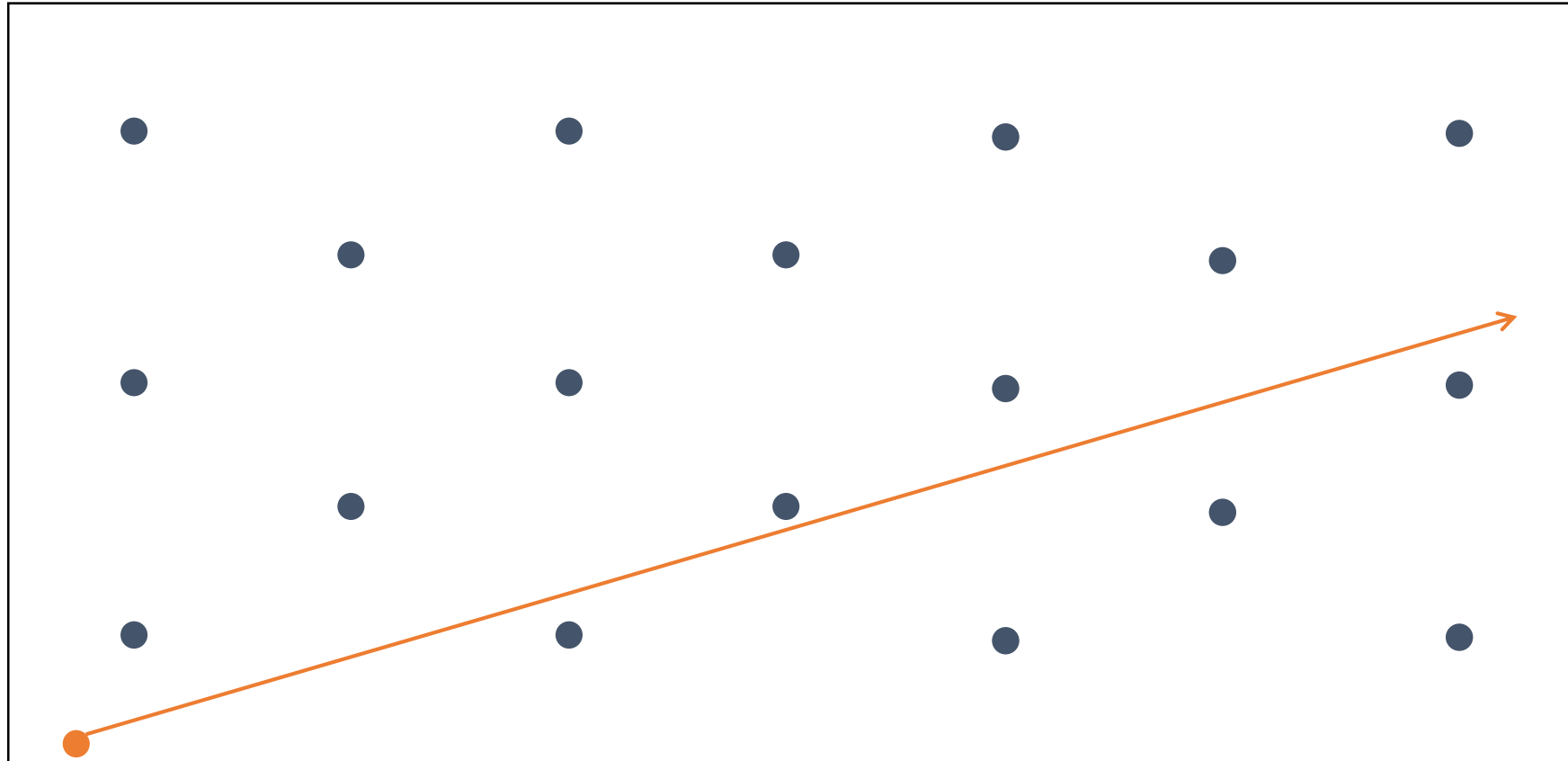
$$= \frac{\text{Production des neutrons}}{\text{Disparition des neutrons}}$$

→ En fonctionnement,  $k_{\text{eff}} = 1$ , le réacteur est **critique**

- Il faut ajuster les probabilités de fission et de capture des neutrons pour équilibrer la réaction en chaîne.
  - Les probabilité d'interaction entre les neutrons et les noyaux sont caractérisées par les sections efficaces (analogue à une surface)



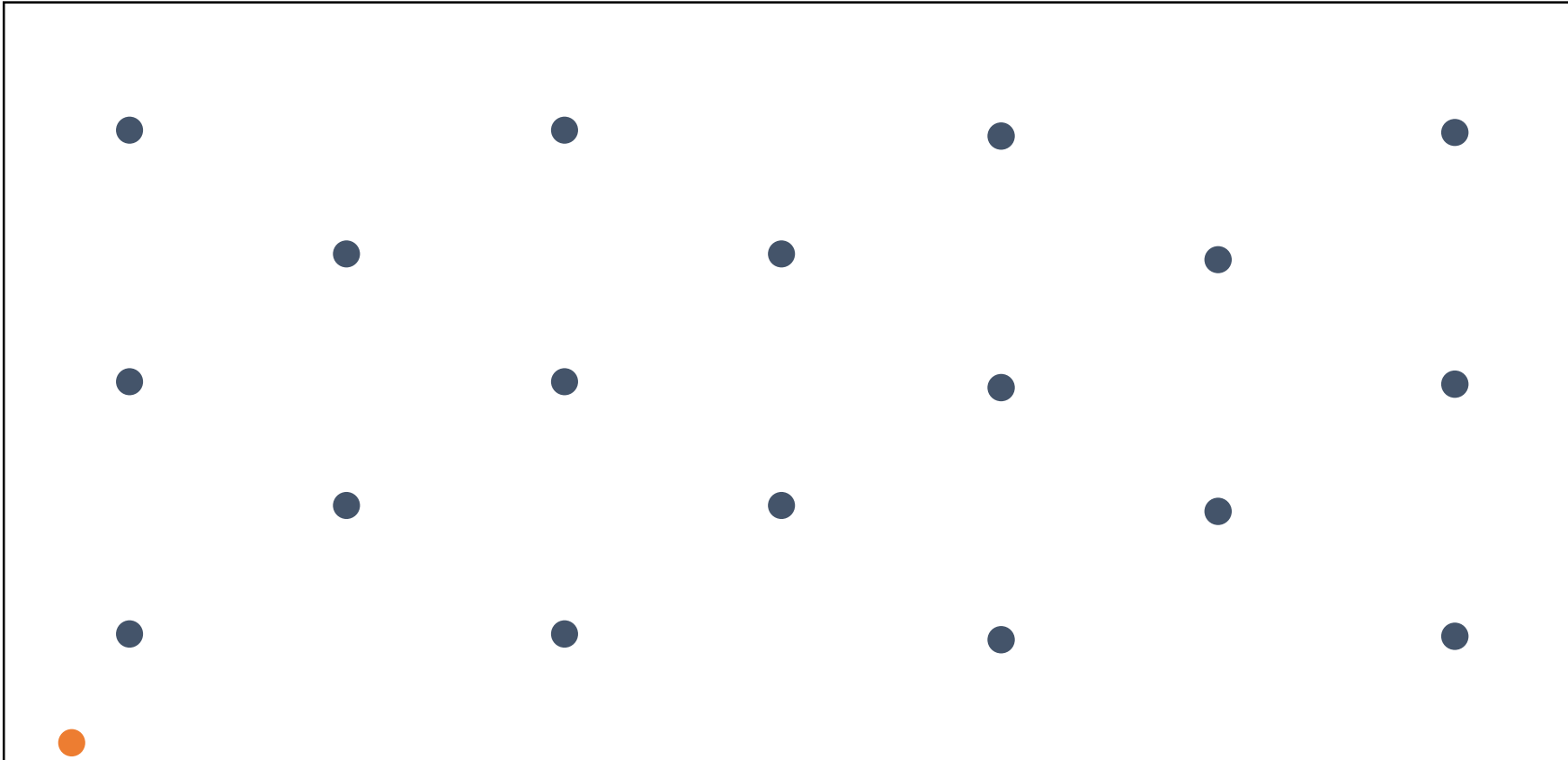




*Les neutrons parcourent de grandes distances sans interagir avec la matière*

Pas de système nucléaire de taille « microscopique »

➤ Quand un neutron interagit avec un noyau, plusieurs scénarios sont possibles :



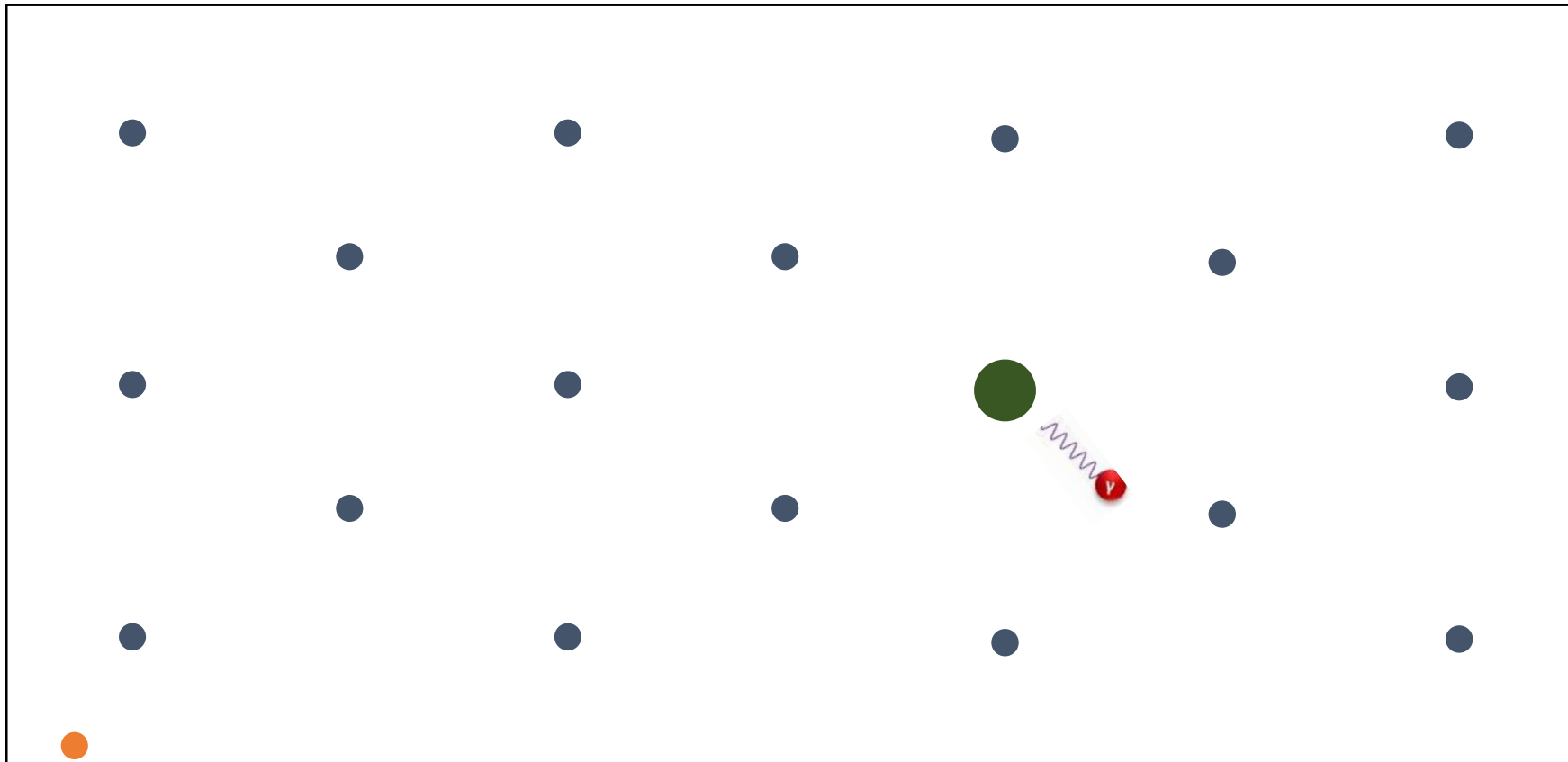
1/ Choc élastique : le neutron cède une partie de son énergie à la cible



# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## Une image d'Épinal des neutrons et de la matière

➤ Quand un neutron interagit avec un noyau, plusieurs scénarios sont possibles :



1/ Choc élastique : le neutron cède une partie de son énergie à la cible

2/ L'absorption neutronique : le neutron est absorbé par le noyau

*Si la cible est fissile ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , ...), l'absorption peut provoquer une fission*

*→ Bilan neutronique = +1,5 neutrons*

*Dans les autres cas, l'absorption est dite stérile*

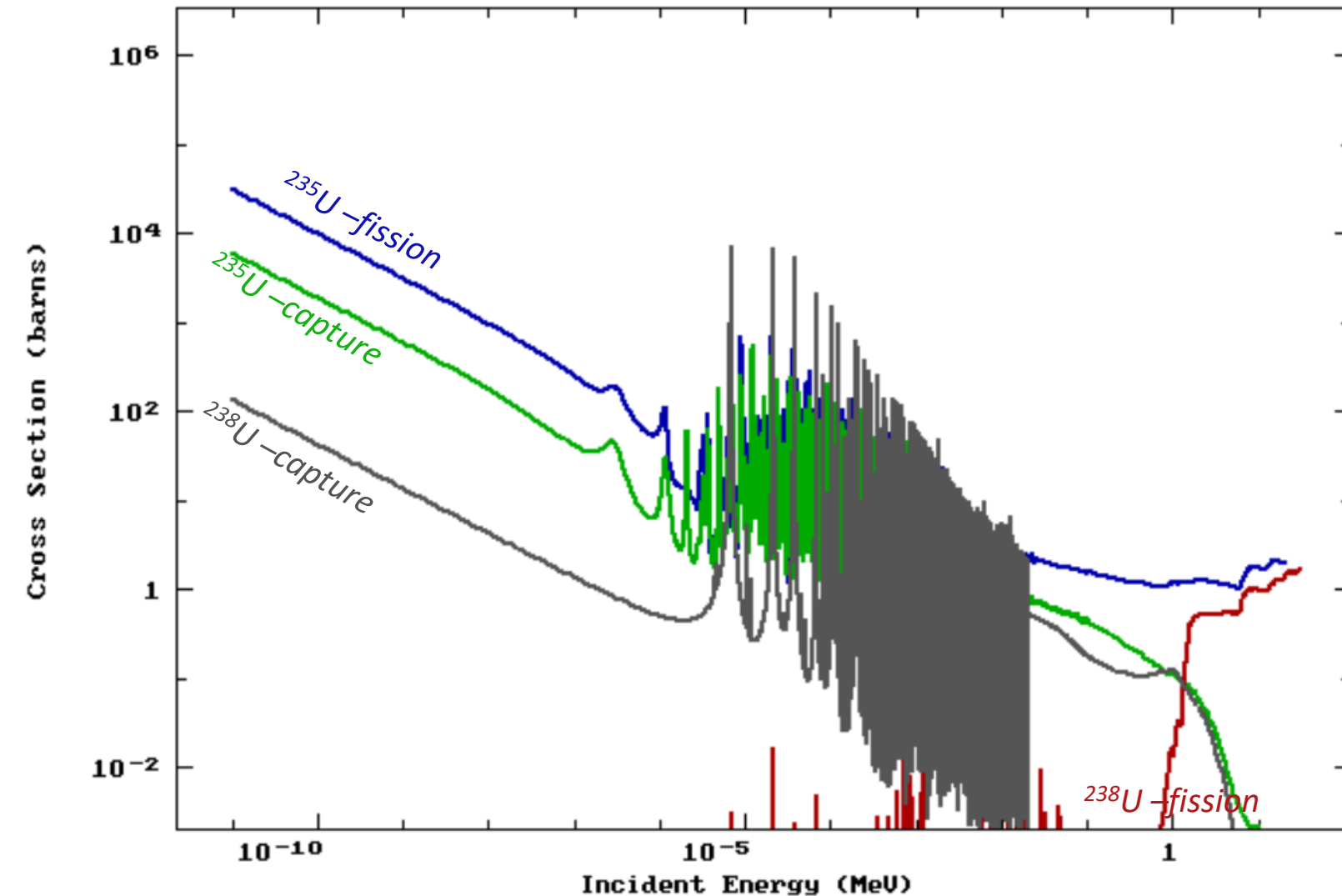
*→ Bilan neutronique = -1 neutron*

*L'uranium 235 est le seul isotope fissile présent sur terre*

# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## Réacteurs à neutrons thermiques

➤ Tout se passe comme si la taille des noyaux dépendait de la vitesse des neutrons :



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

$$\text{Production des neutrons} = \nu \cdot N_{\text{fiss}} \cdot \sigma_{\text{fiss}} \cdot \varphi$$

$$\text{Disparition des neutrons} = \sum_i N_i \cdot \sigma_{\text{abs}}^i \cdot \varphi$$

$\varphi$  = flux de neutrons (densité neutronique)

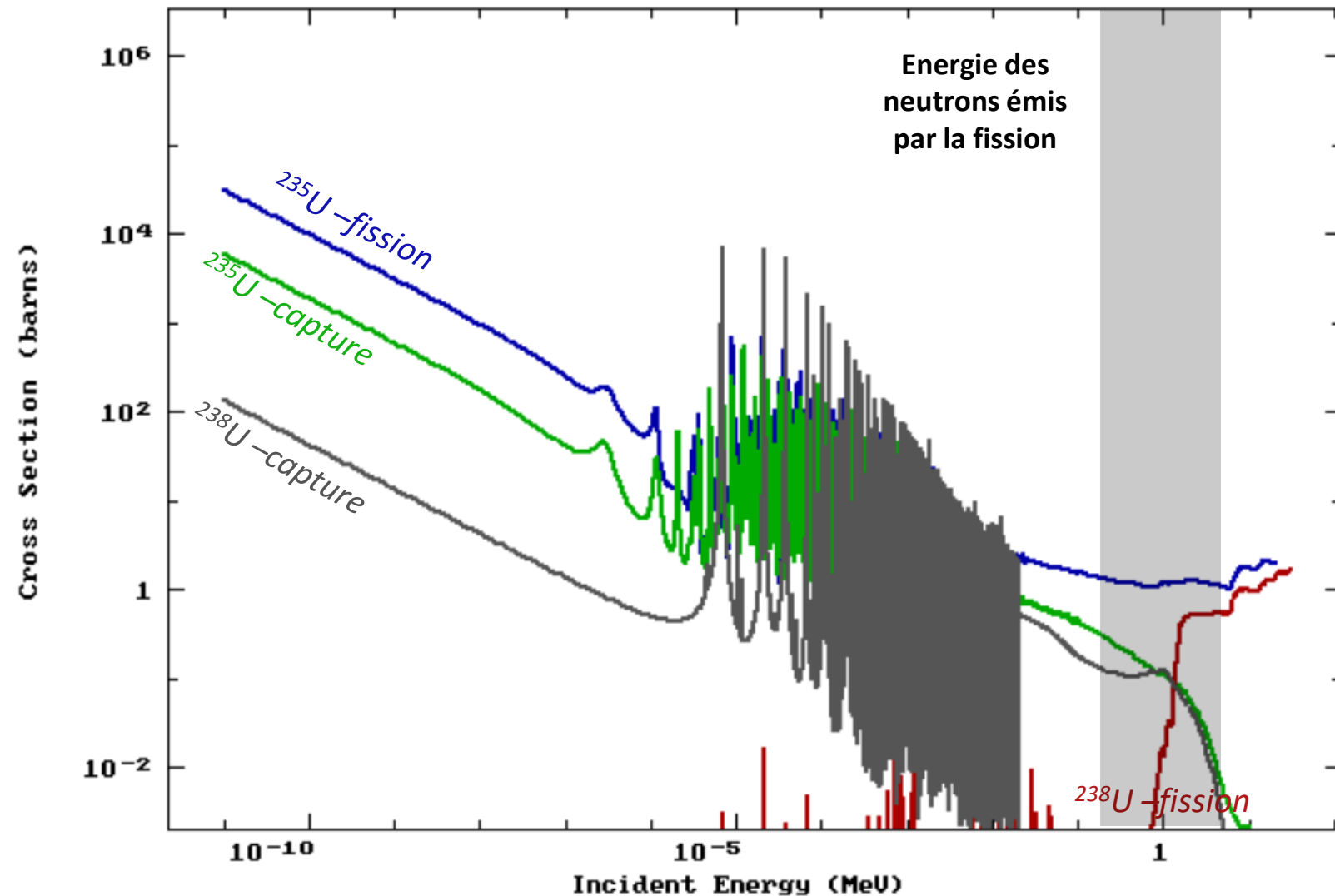
$N_i$  = densité de noyaux  $i$

$\nu$  = nombre de neutrons émis par fission

$\sigma_{\text{réaction}}^i$  = section efficace de réaction

# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## Réacteurs à neutrons thermiques



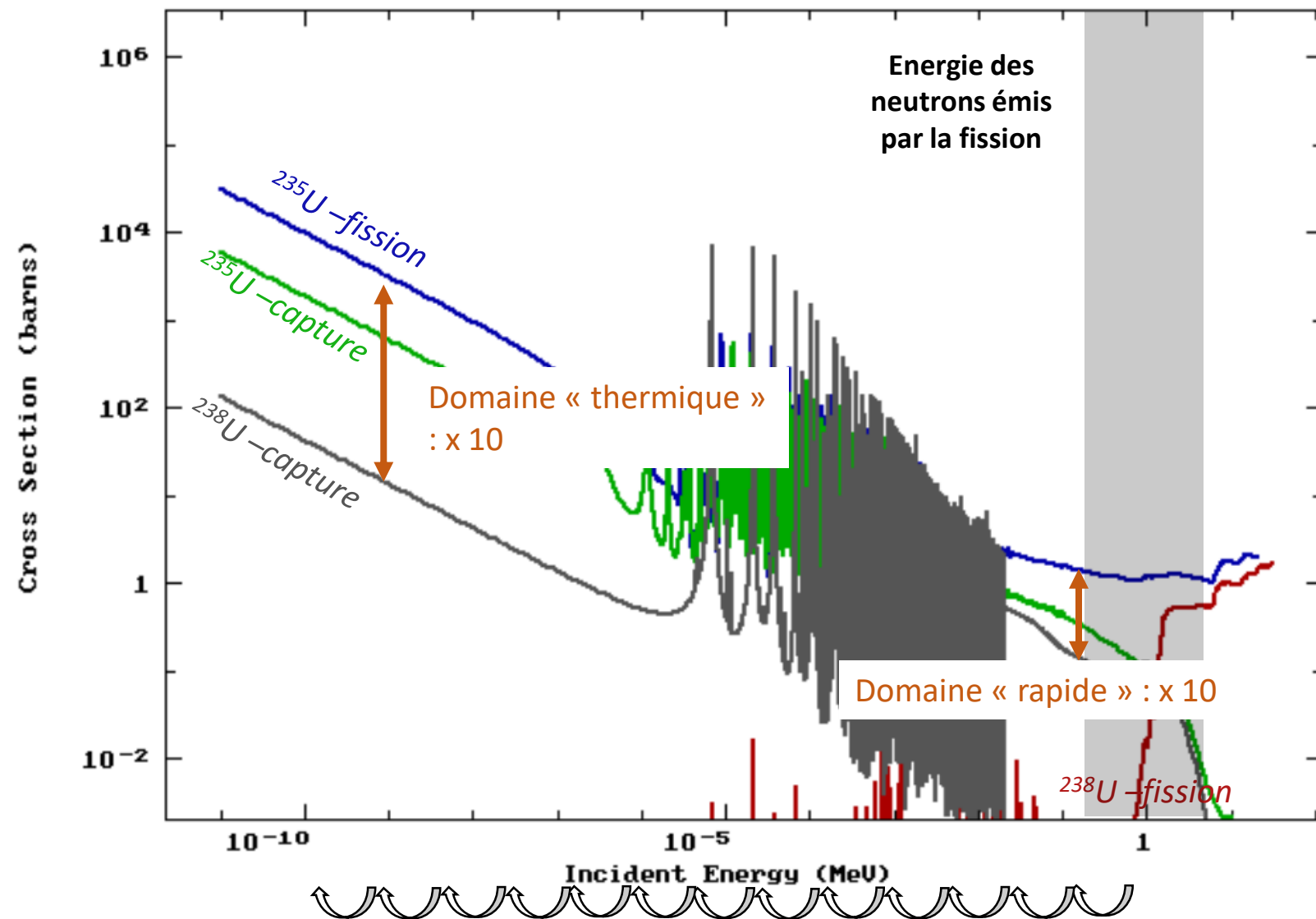
$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Production des neutrons}}{\text{Disparition des neutrons}}$$

➤ Il faut considérer le **ratio** des sections efficaces

→ *Pas de système critique basée sur la fission de l'U-238*

# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## Réacteurs à neutrons thermiques

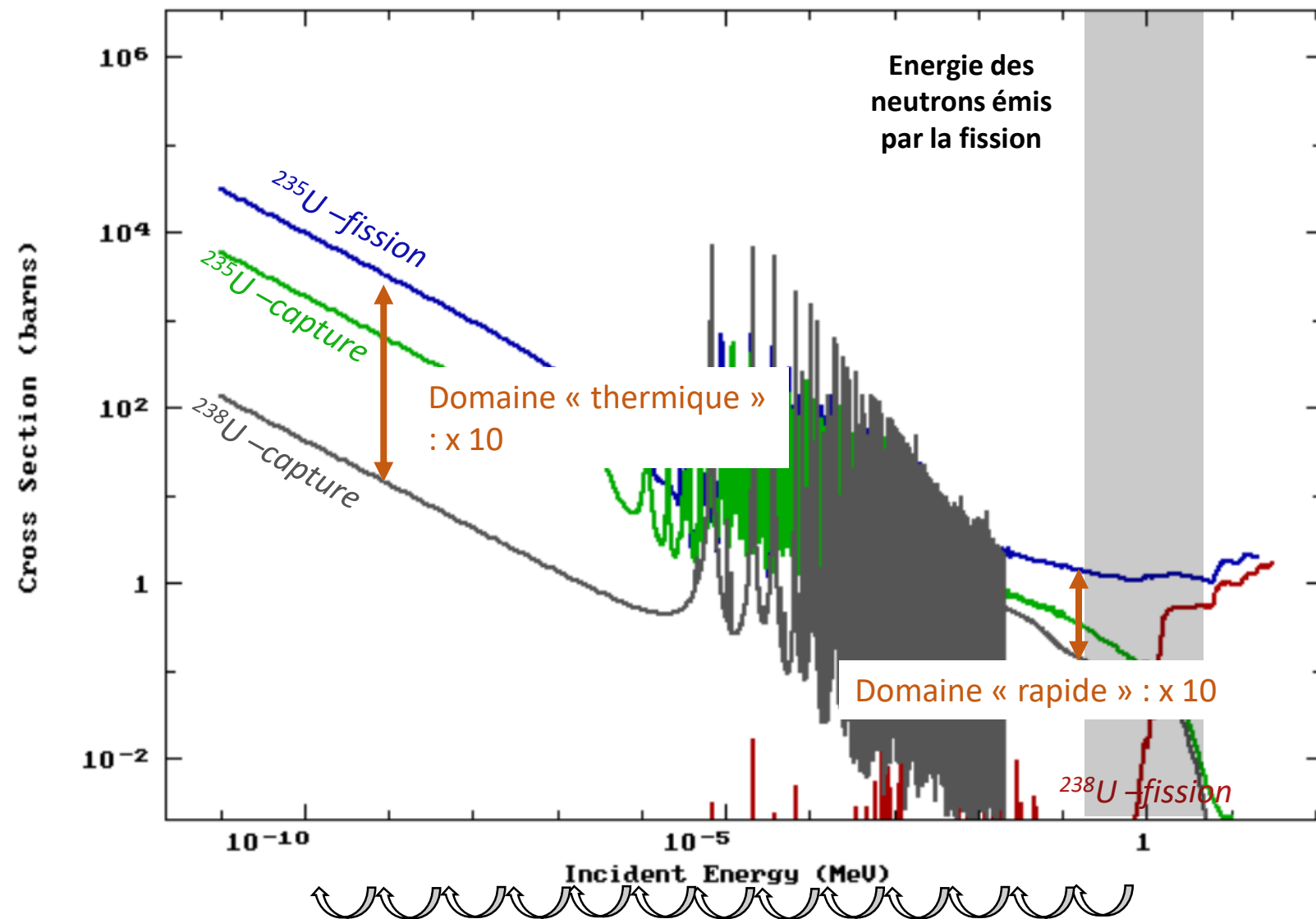


$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Production des neutrons}}{\text{Disparition des neutrons}}$$

- Il faut considérer le **ratio** des sections efficaces
  - *Pas de système critique basée sur la fission de l'U-238*
  - *Ratio des sections efficaces bien plus favorable avec des neutrons « lents »*
  - *Ralentissement des neutrons par choc élastique sur l'hydrogène de l'eau (modérateur = caloporteur)*

# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## Réacteurs à neutrons thermiques



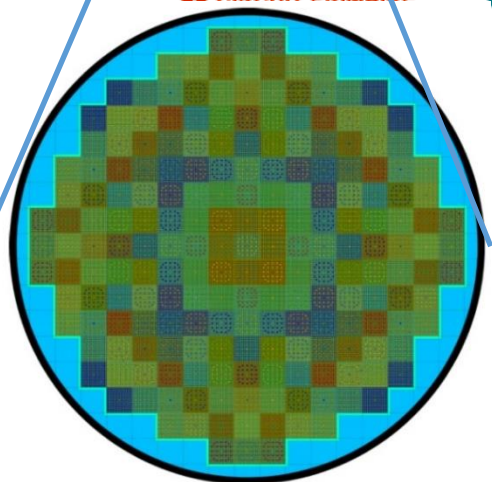
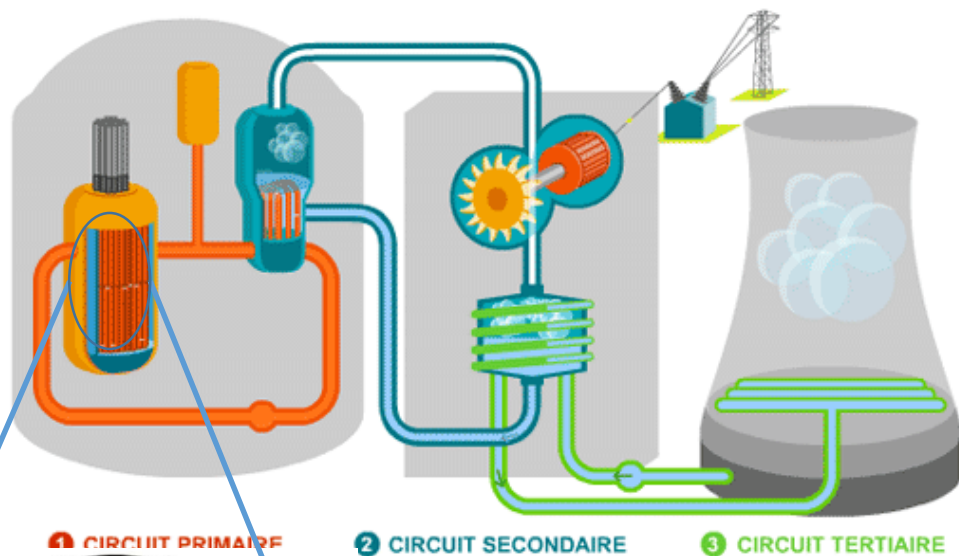
$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Production des neutrons}}{\text{Disparition des neutrons}}$$

- Il faut considérer le **ratio** des sections efficaces
  - *Pas de système critique basée sur la fission de l'U-238*
  - *Ratio des sections efficaces bien plus favorable avec des neutrons « lents »*
  - *Ralentissement des neutrons par choc élastique sur l'hydrogène de l'eau (modérateur = caloporteur)*
- Pour augmenter la probabilité de fission, on augmente la concentration de noyaux fissiles (**enrichissement**)
  - 3-5% pour les UOX

# Fonctionnement des réacteurs

## Présentation d'un REP

- L'eau qui permet l'évacuation des calories permet la modération des neutrons  
→ Concept de sûreté « passive »



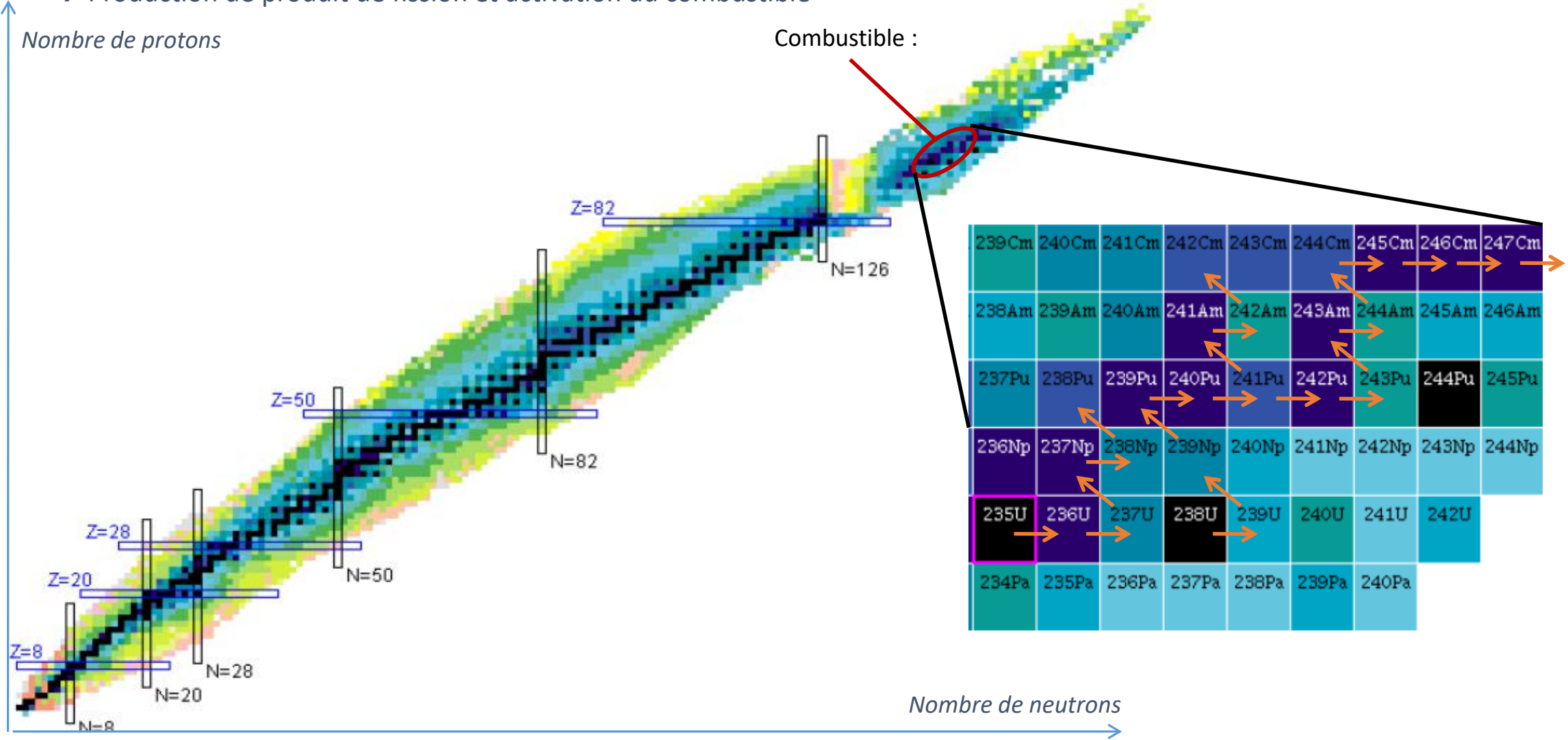
Cœur : ~ 4m de diamètre et 4m de hauteur  
Puissance thermique dégagée de 3 à 4,5 GW



# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## L'évolution du combustible

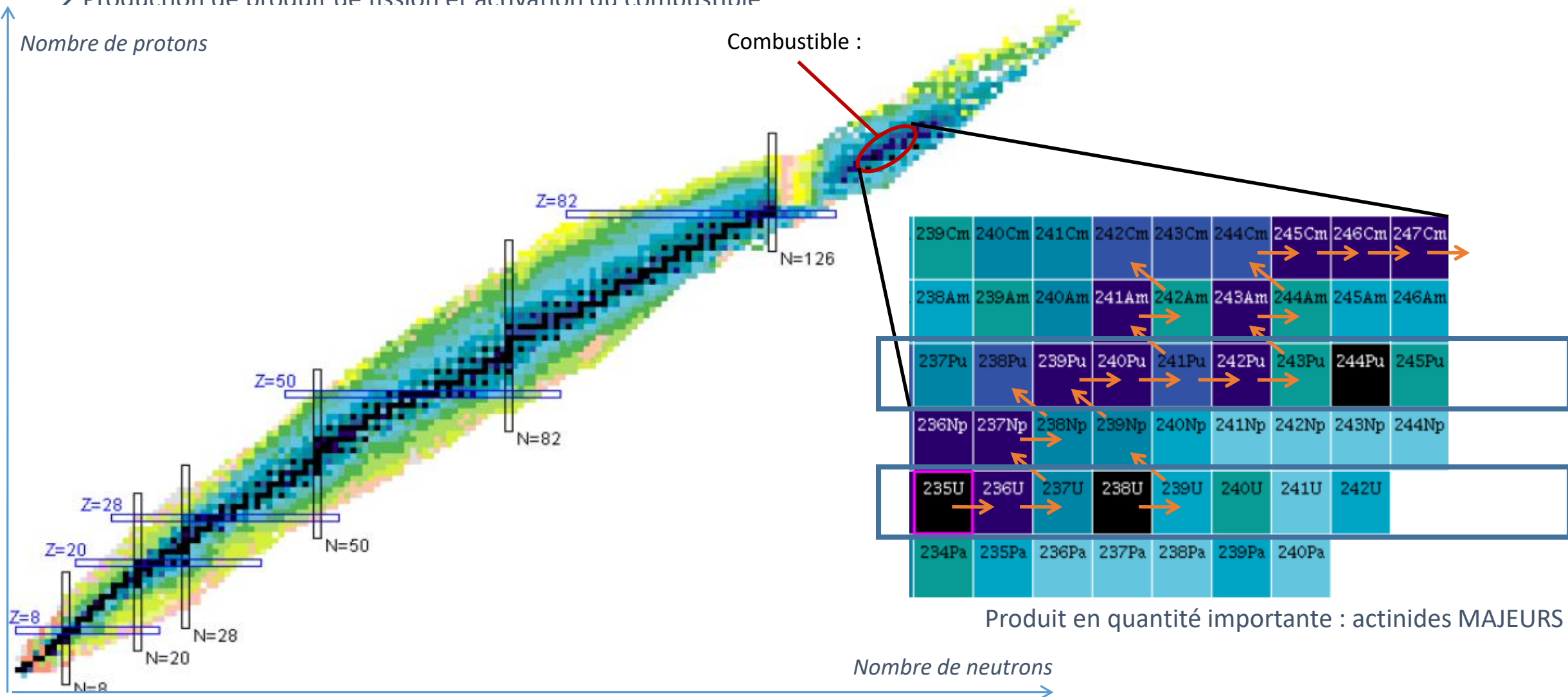
- En fonctionnement, la réaction en chaîne est toujours équilibrée
  - Production de produit de fission et activation du combustible



# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## L'évolution du combustible

- En fonctionnement, la réaction en chaîne est toujours équilibrée  
→ Production de produit de fission et activation du combustible

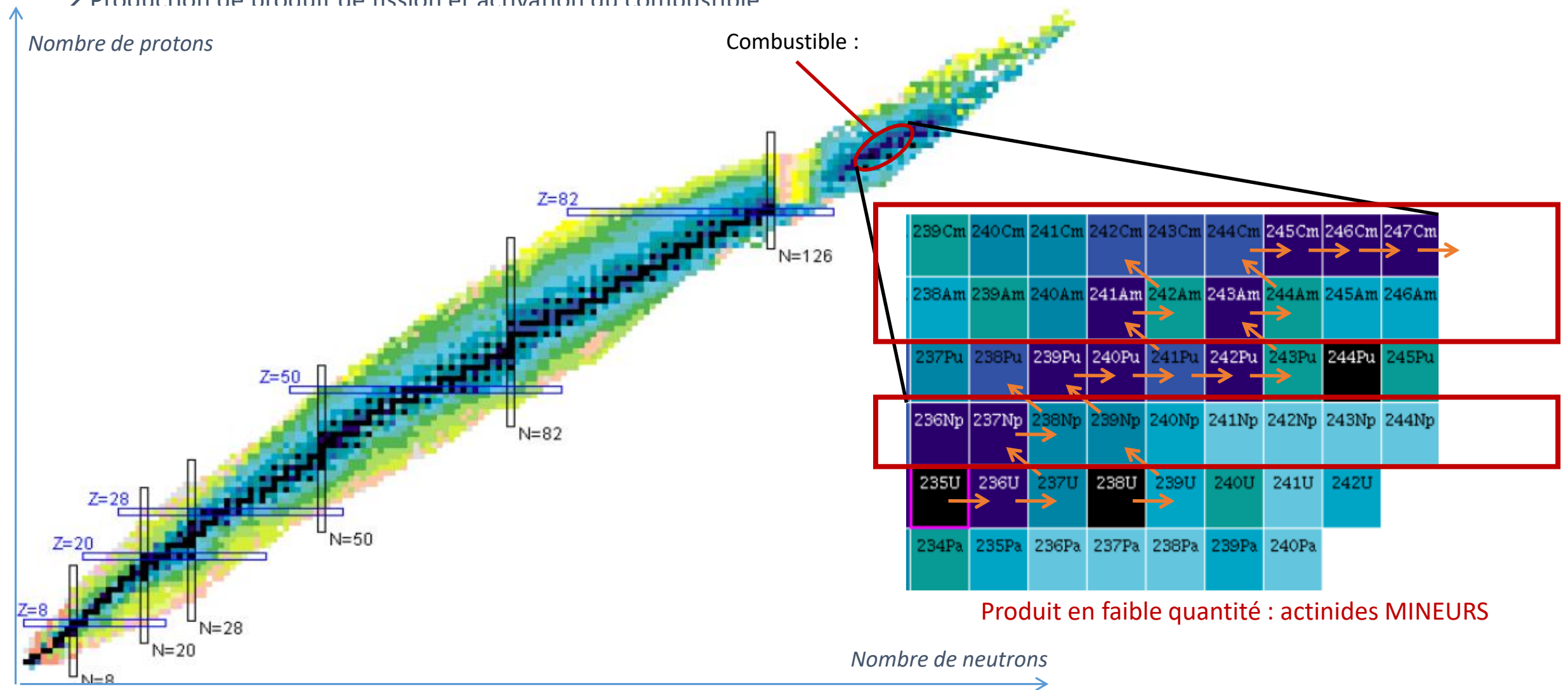




# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## L'évolution du combustible

- En fonctionnement, la réaction en chaîne est toujours équilibrée
  - Production de produit de fission et activation du combustible



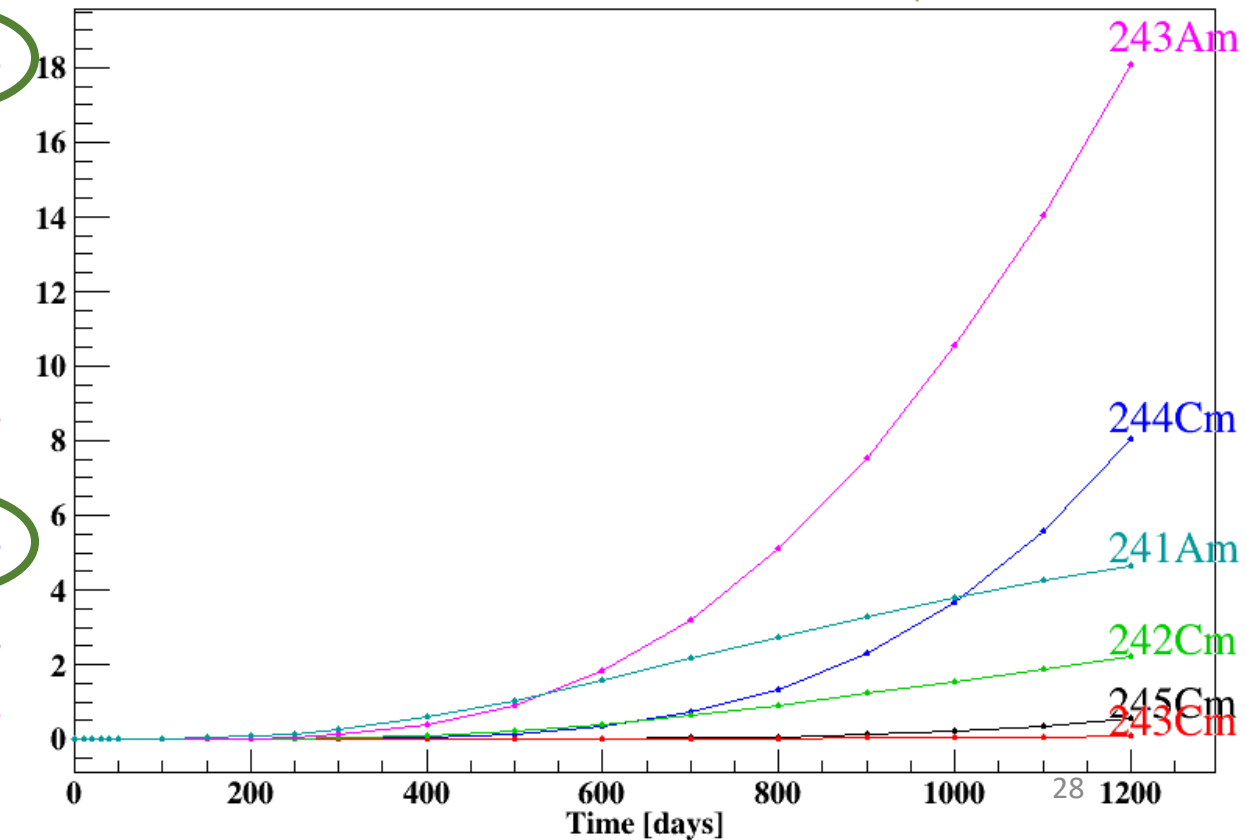
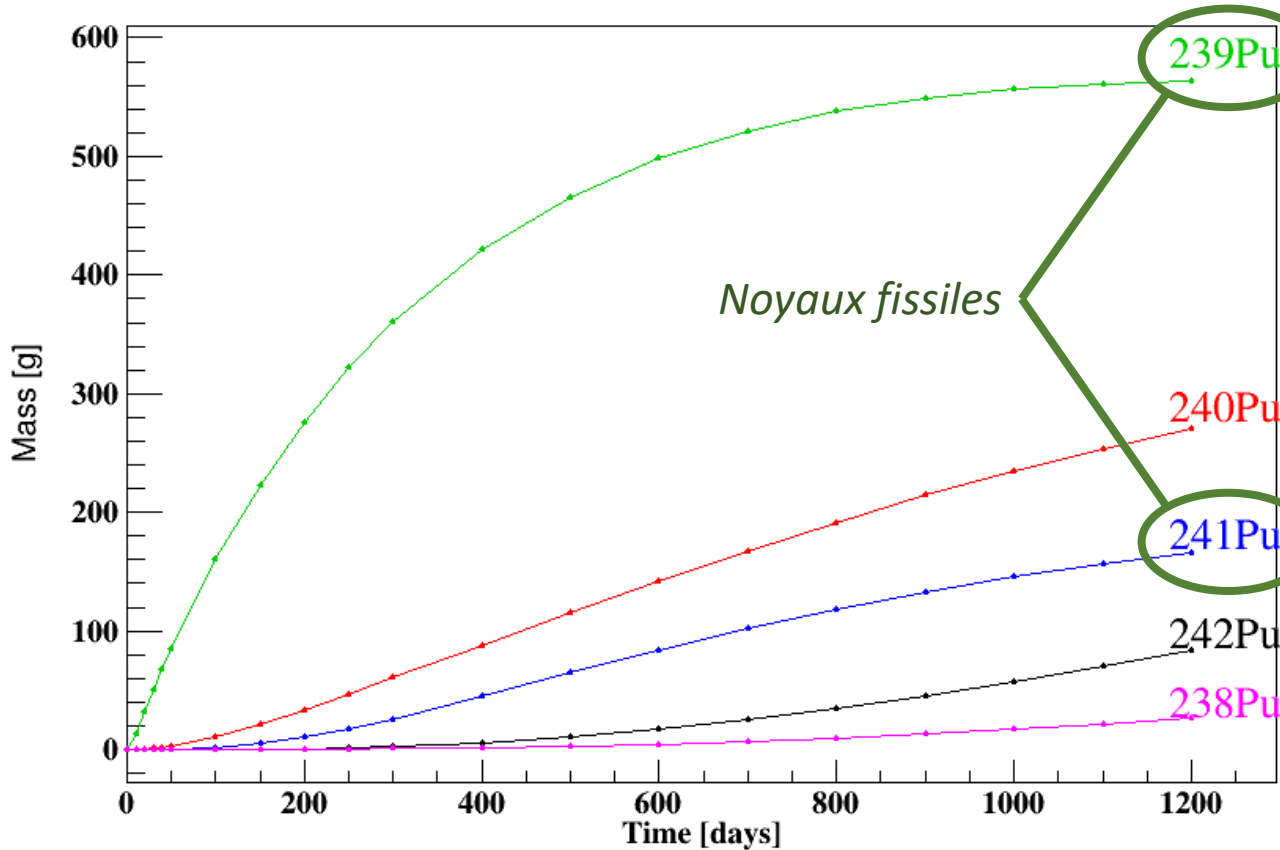
# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## L'évolution du combustible

➤ L'évolution du combustible est conduite par les équation de Bateman

$$\frac{dN_i}{dt} = \underbrace{-\lambda_i N_i - N_i \sigma_{abs} \phi}_{\text{Disparition}} + \underbrace{\sum_{j \neq i} \lambda_{j \rightarrow i} N_j + N_j \sigma_{j \rightarrow i} \phi}_{\text{Production}}$$

Si on maintient les matières sous irradiation, on arrive à un équilibre



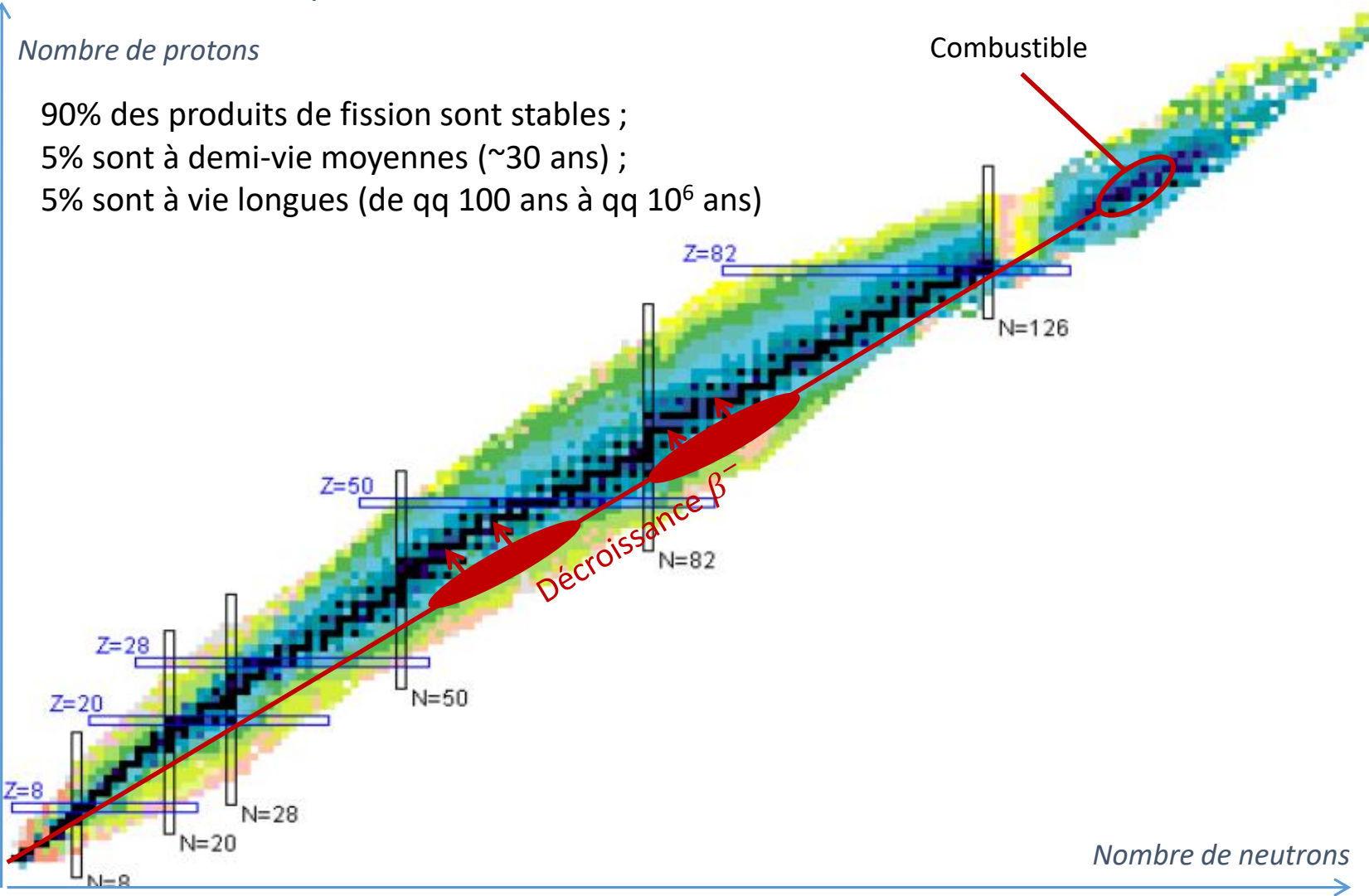
# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## Les produits de fission et la chaleur résiduelle

- En fonctionnement, la réaction en chaîne est toujours équilibrée
  - Production de produit de fission et activation du combustible

Nombre de protons

90% des produits de fission sont stables ;  
5% sont à demi-vie moyennes ( $\sim 30$  ans) ;  
5% sont à vie longues (de qq 100 ans à qq  $10^6$  ans)



Nombre de neutrons

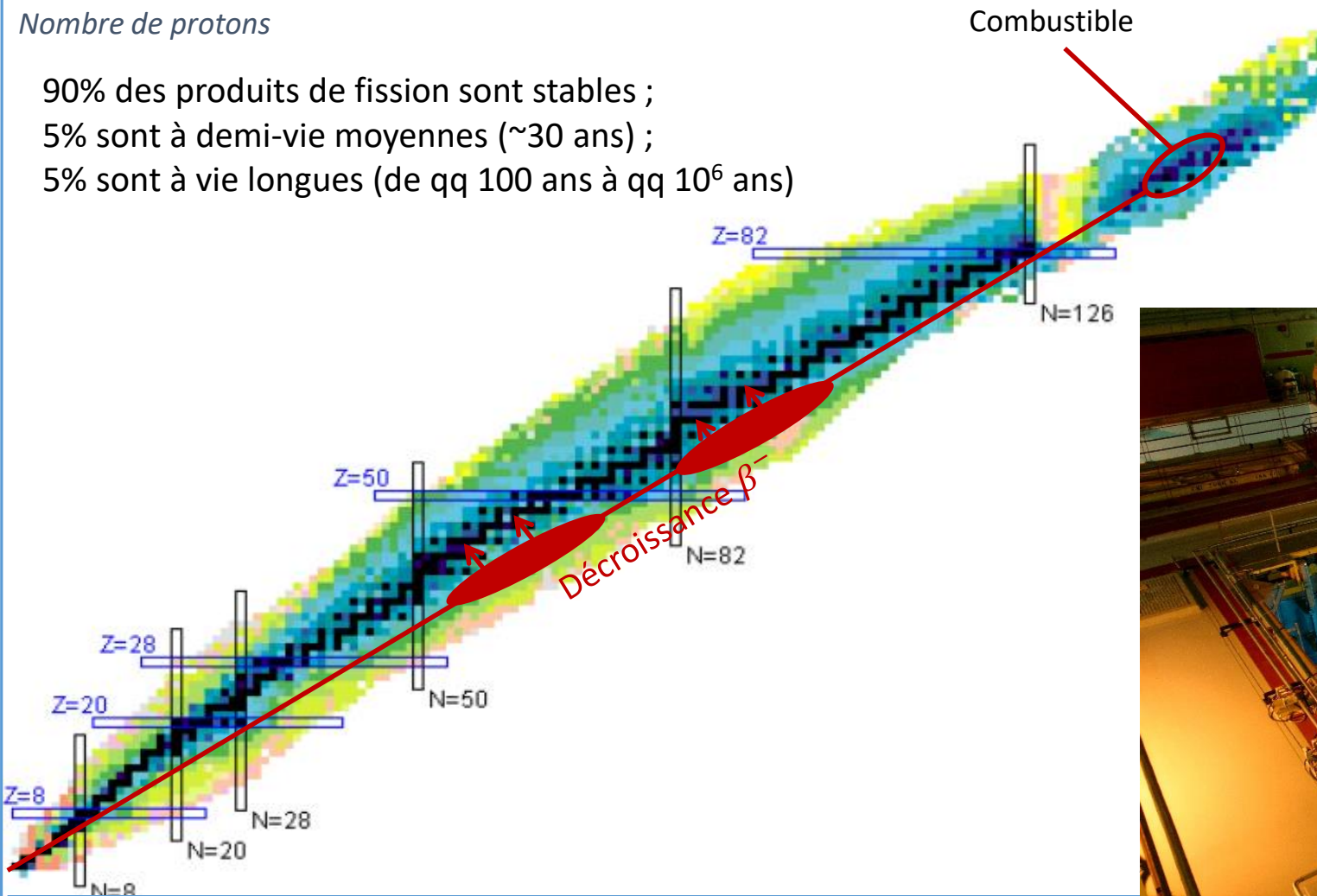
# I/ Principes de fonctionnement des réacteurs

## Les produits de fission et la chaleur résiduelle

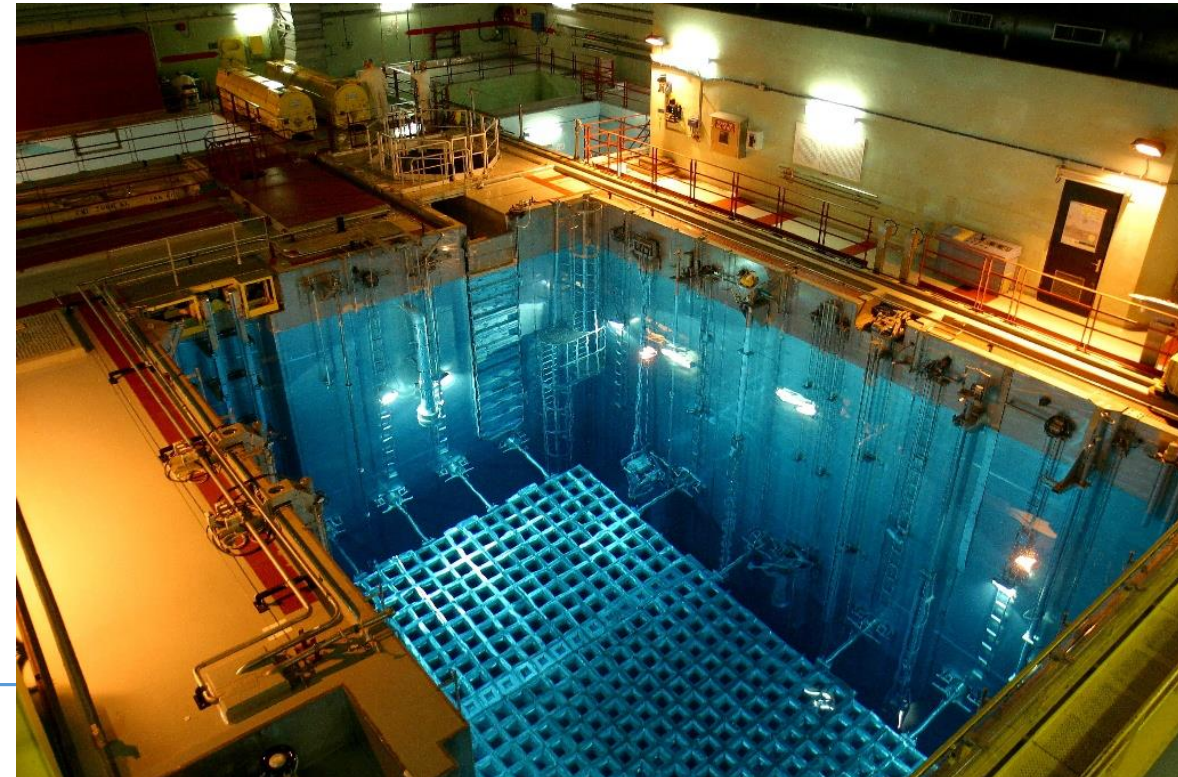
- En fonctionnement, la réaction en chaîne est toujours équilibrée  
→ Production de produit de fission et activation du combustible

Nombre de protons

90% des produits de fission sont stables ;  
5% sont à demi-vie moyennes ( $\sim 30$  ans) ;  
5% sont à vie longues (de qq 100 ans à qq  $10^6$  ans)



- L'activité du combustible représente  $\sim 7\%$  de la puissance dégagée
- La chaleur dégagée décroît lentement avec les décroissances ( $\sim 0,3\%$  après une semaine)
- Après passage en réacteur, le **combustible est laissé dans des piscines de refroidissement** pendant plusieurs années



# Energie(s) nucléaires, du futur

## PART - II

*Les enjeux scientifiques et l'intérêt d'une approche académique*

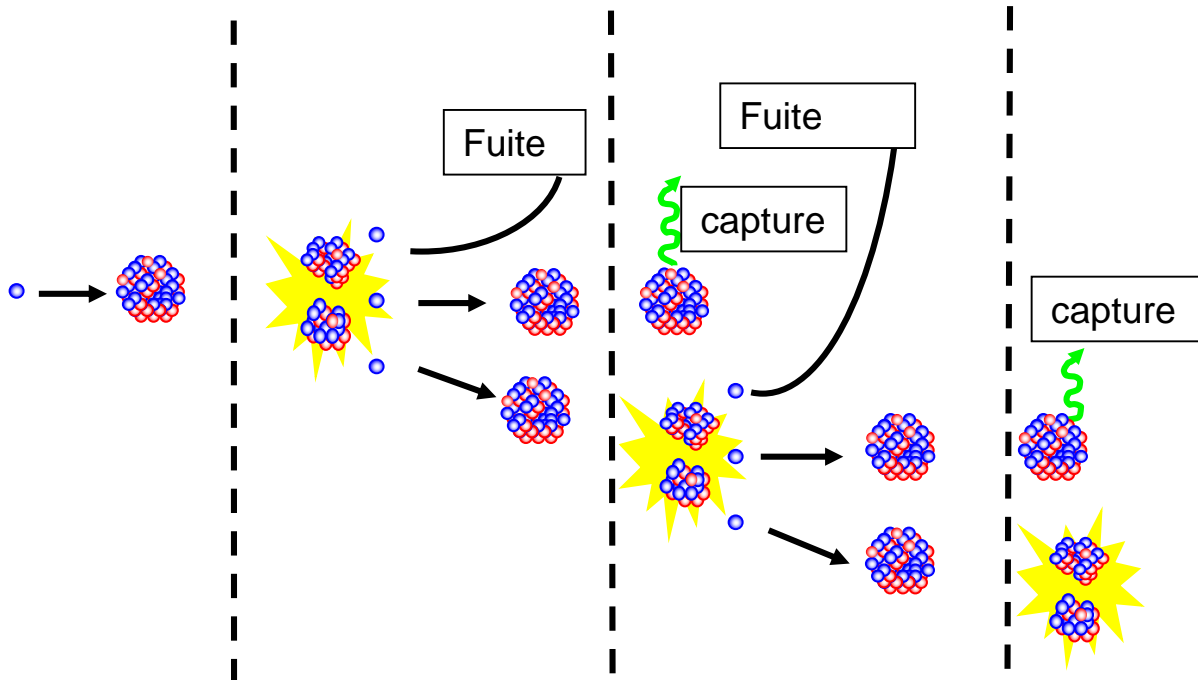
Xavier Doligez, IJC-lab Orsay

Rencontres de physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit

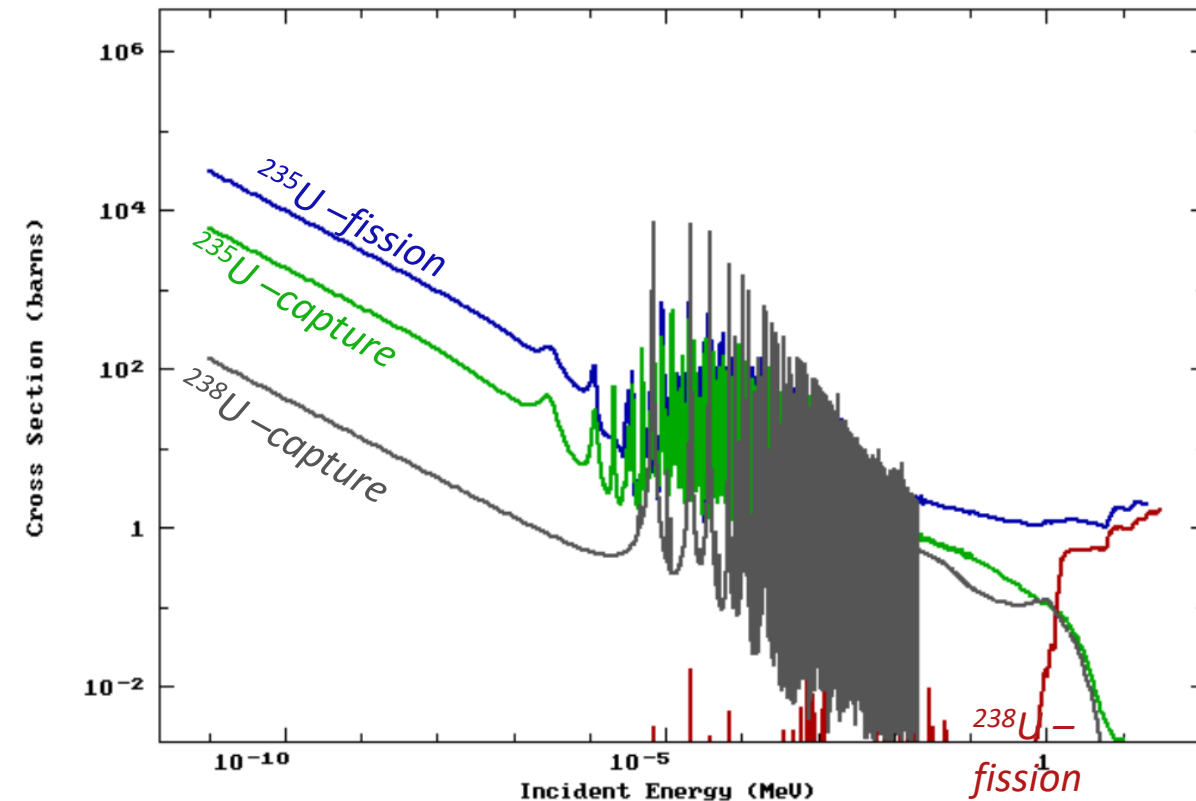
*11-22 juillet 2022 - promotion Richard Feynman*

# Quelques rappels d'hier

- L'objectif est d'établir une réaction en chaîne, stable et auto-entretenu



$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Production des neutrons par fission}}{\text{Disparition des neutrons}} = 1$$

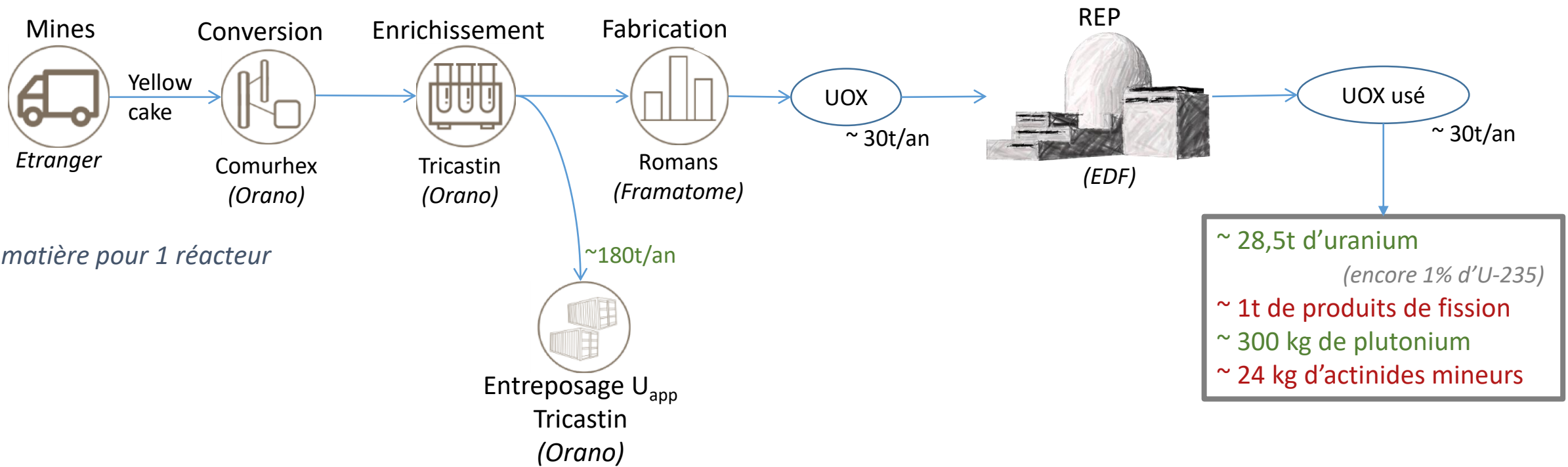


- La criticité renseigne un état « instantané » du système
  - ➔ Mais dans un réacteur de puissance, le combustible nucléaire évolue  
*Production de produits de fission, de plutonium et d'actinides mineurs...*

1. Fonctionnement des réacteurs
  - ✓ Principe de la réaction en chaîne
  - ✓ L'importance de la thermalisation des neutrons
  - ✓ Présentation d'un REP
  - ✓ L'évolution du combustible
  
2. **Le cycle du combustible Français**
  - ✓ **Bilan matière pour un cycle ouvert**
  - ✓ **Spécificité du parc Français : le recyclage du plutonium**
  - ✓ **Comparaison cycle ouvert/cycle MOX**
  
3. Les enjeux pour le parc à l'échéance 2050
  - ✓ La « crise » des piscines
  - ✓ Le moxage des REP 1300
  - ✓ Le Multi-recyclage du plutonium
  - ✓ EPR vs EPR2
  - ✓ CIGEO : projet de stockage des déchets HA-VL
  
4. Les enjeux pour le parc à l'échéance 2090
  - ✓ L'épineuse question du plutonium
  - ✓ Le multi-recyclage dans les systèmes rapides et la fermeture du cycle
  - ✓ La transmutation des actinides mineurs
  - ✓ Les RNR-Na et les autres systèmes de GEN IV

# II/ Le cycle du combustible

## Principe d'un cycle ouvert

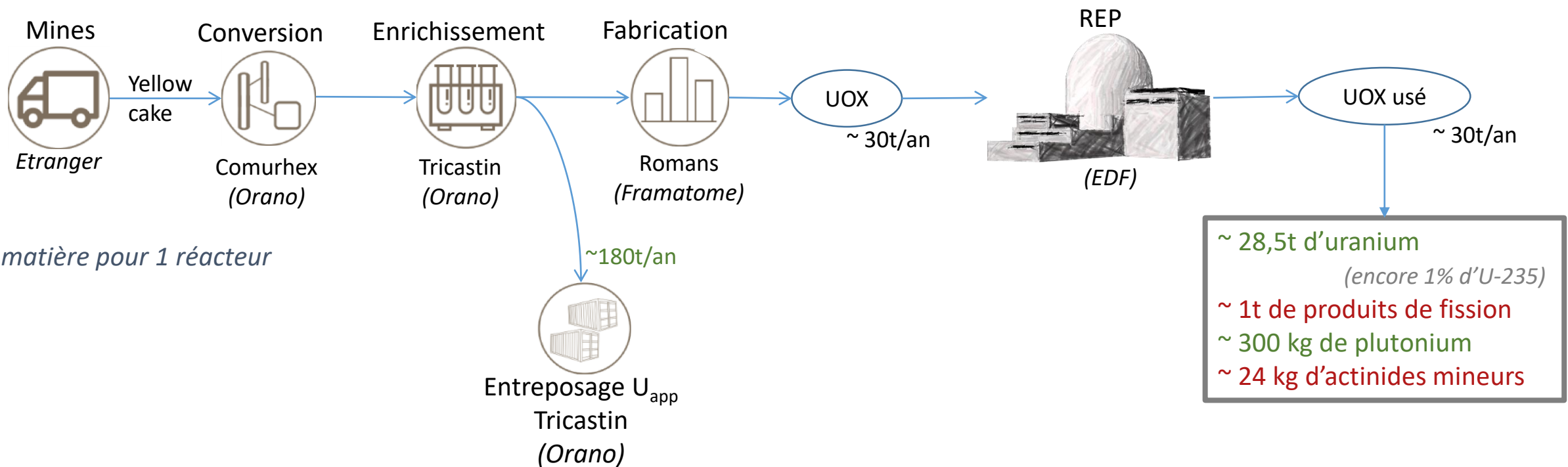


Bilan matière pour 1 réacteur



## II/ Le cycle du combustible

### Principe d'un cycle ouvert



Bilan matière pour 1 réacteur

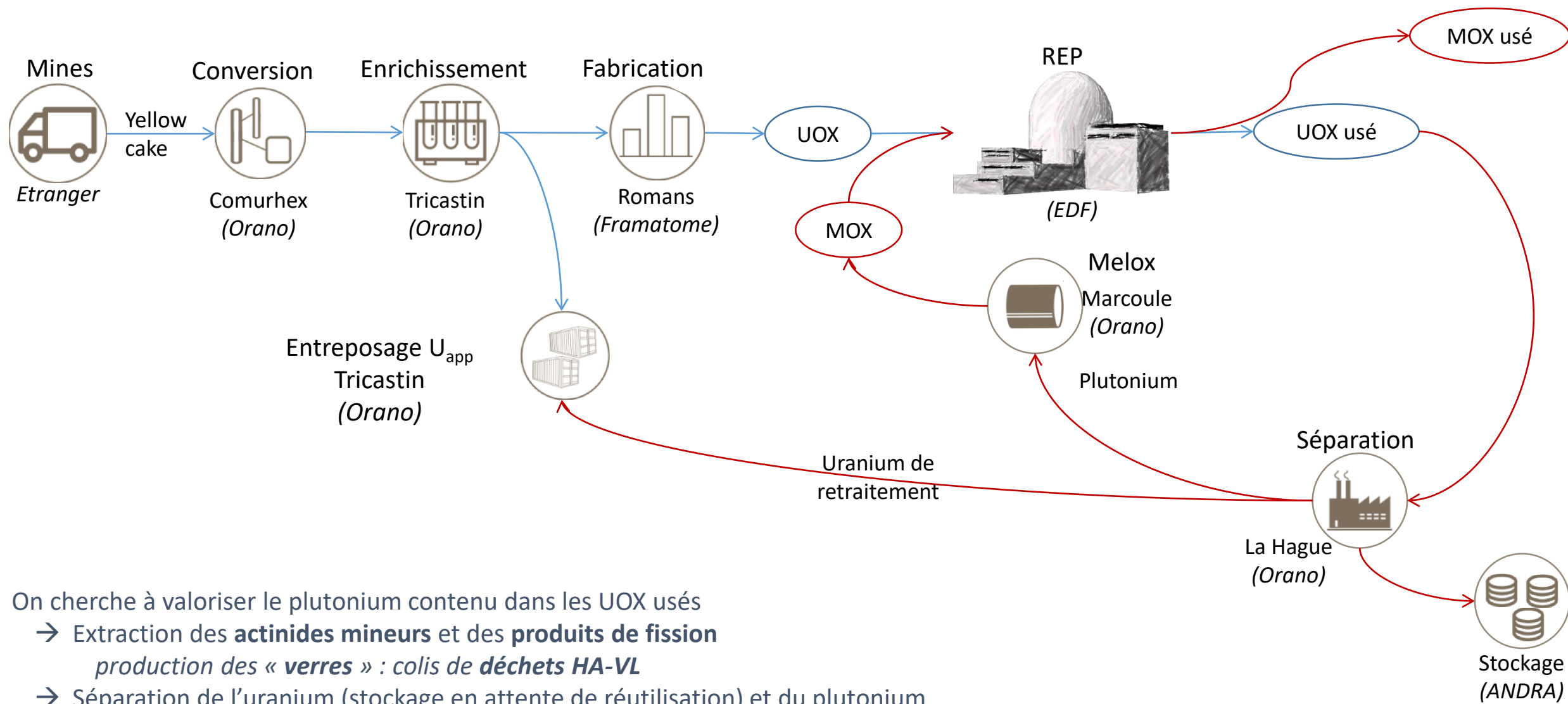
➤ Il existe une différence (législative) entre « déchets » et « matière » :

→ **Matière** : Une matière radioactive est une substance radioactive pour laquelle une **utilisation ultérieure est prévue ou envisagée**, le cas échéant après traitement (article L. 542-1-1 du code de l'environnement)

→ **Déchets** : Les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles **aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée** (article L. 542-1-1 du code de l'environnement)

## II/ Le cycle du combustible

### La spécificité française : le mono-recyclage du plutonium

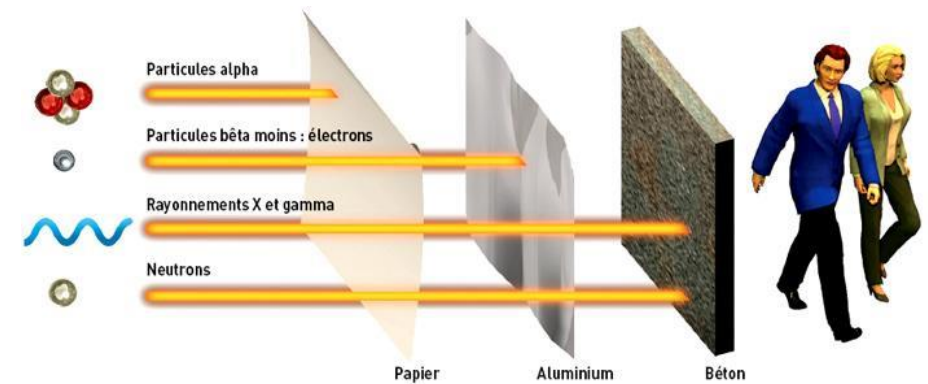


- On cherche à valoriser le plutonium contenu dans les UOX usés
  - Extraction des **actinides mineurs** et des **produits de fission**  
*production des « verres » : colis de déchets HA-VL*
  - Séparation de l'uranium (stockage en attente de réutilisation) et du plutonium
  - Utilisation des combustibles MOX dans les REP 900

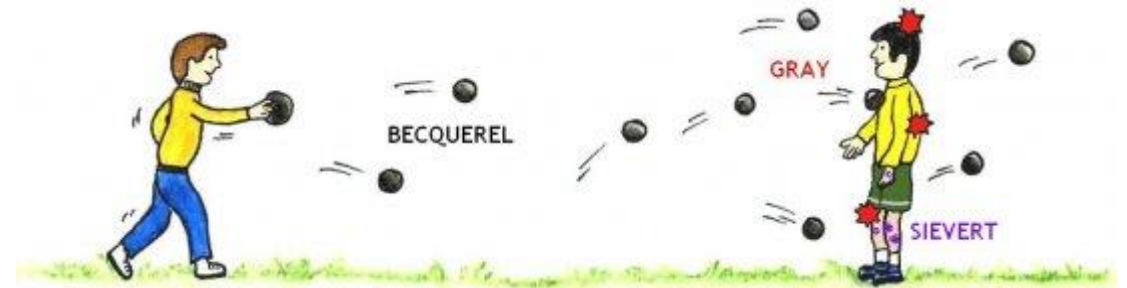
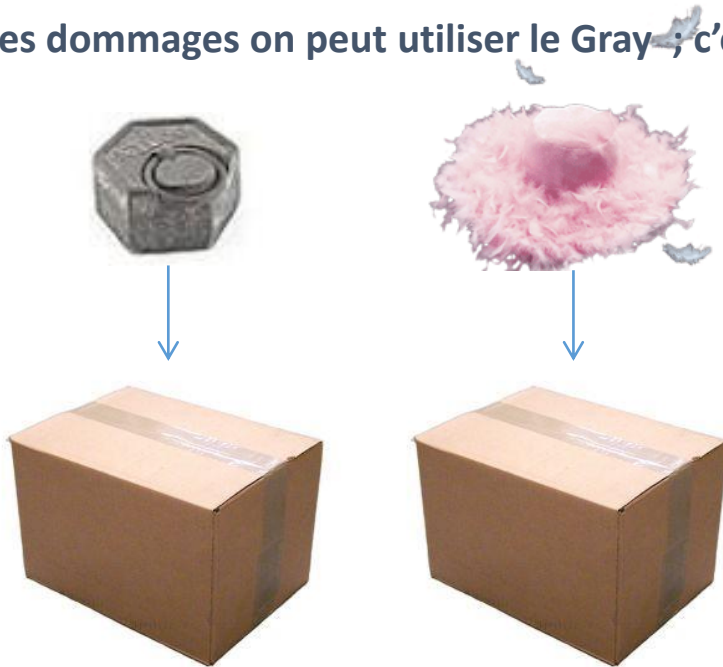
## II/ Le cycle du combustible

### La difficile question des effets de la radioactivité sur le corps humain

- **Unité de la radioactivité : le Becquerel (nombre d'évènement par secondes sans distinction du type, de l'énergie, etc...)**  
→ Activité de l'homme : ~1000 Bq/kg



- **Pour mesurer les dommages on peut utiliser le Gray ; c'est l'énergie massique déposé ( $1\text{Gy} = 1\text{J} / \text{kg}$ )**



- **Pour mesurer les effets sur le corps humain, on utilise encore une autre unité : le Sievert (radiotoxicité) !**

## II/ Le cycle du combustible

### La radioactivité c'est dangereux !

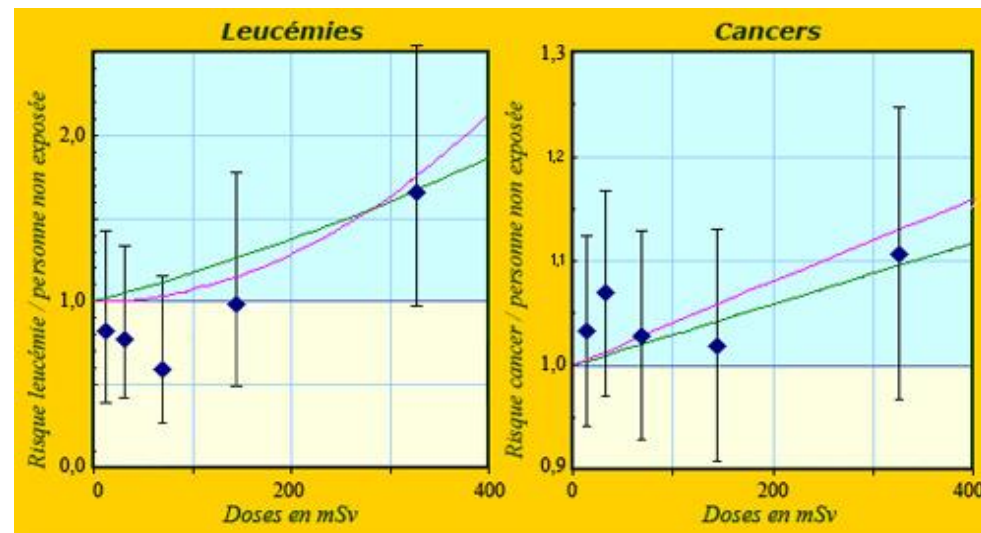
#### → Effet directs à haute dose :

- 40 Sv : Destruction des cellules nerveuses : coma et mort
- 20 Sv : Seuil des brûlures
- 10 Sv : Nausée, vomissement : hémorragie digestive létal

#### → Oui mais... Et la radioactivité naturelle ??

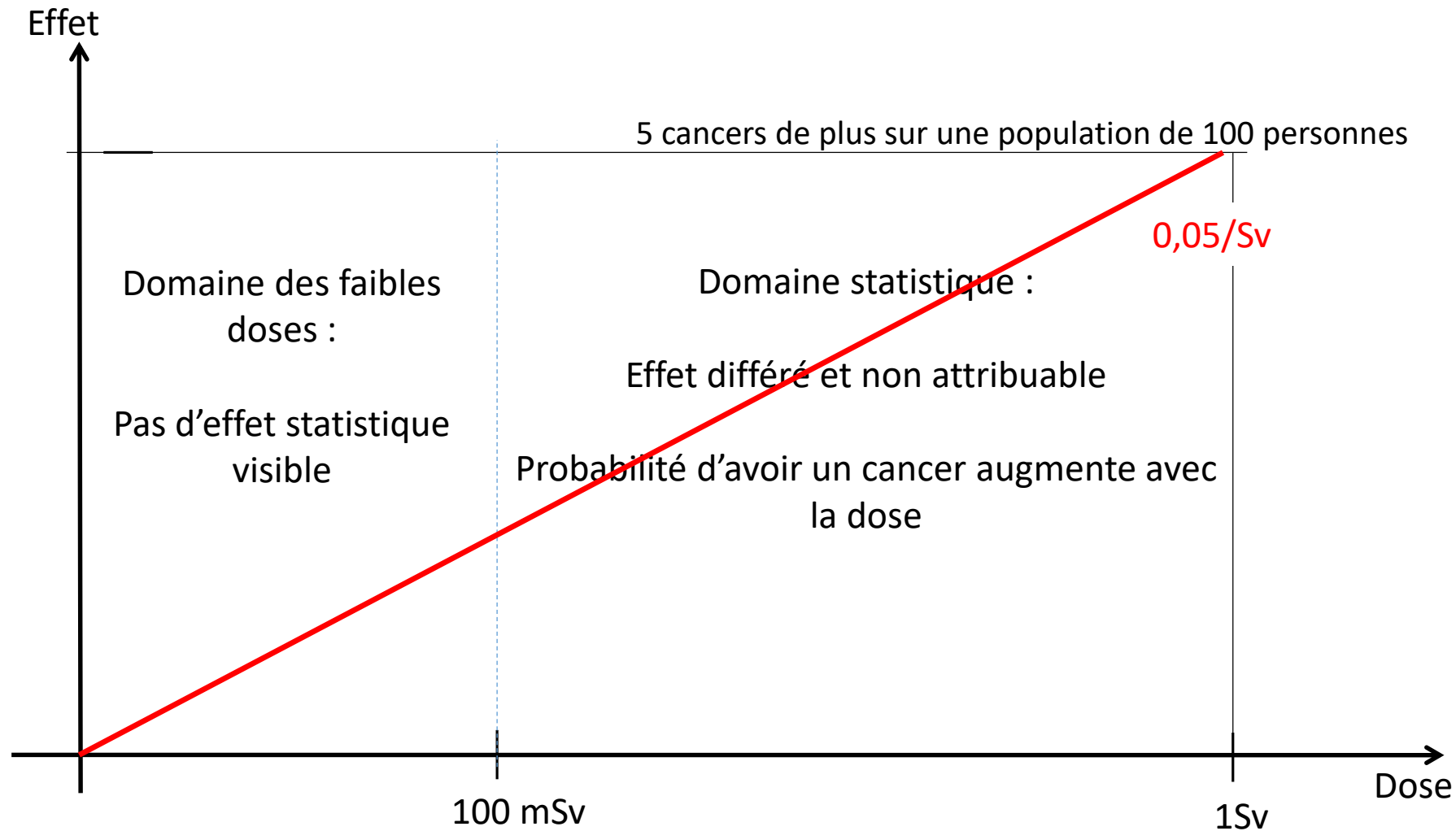
- En France, le niveau est de 2,4 mSv par an
- Au Brésil et en Inde, il peut atteindre 50 mSv par an
- Un scanner corps entier dépose ~10 mSv

#### → Etude sur les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki



## II/ Le cycle du combustible

La loi linéaire sans seuil !



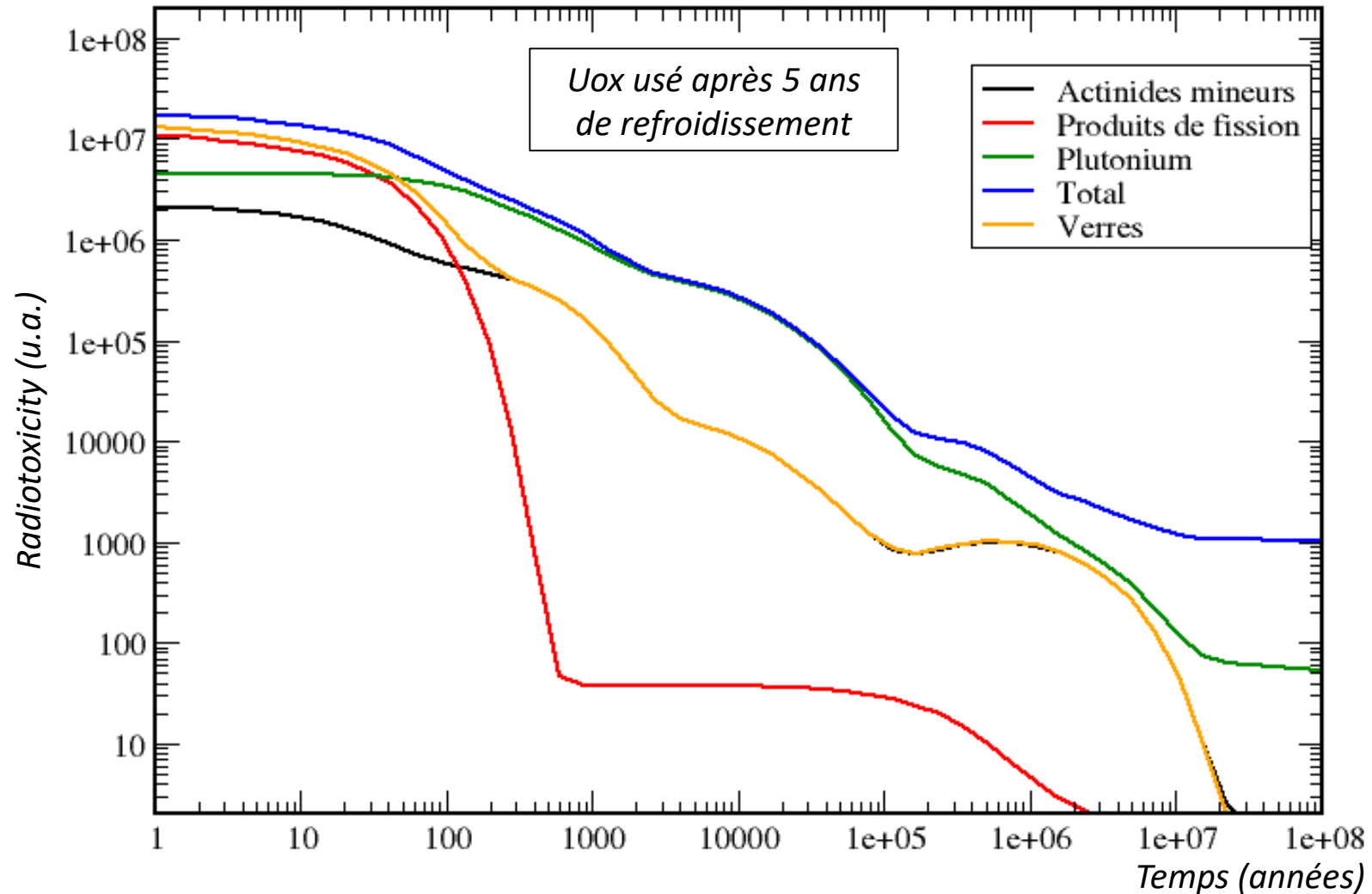
La commission internationale de protection radiologique (CIPR) fait l'hypothèse que l'effet reste proportionnel à la dose

## II/ Le cycle du combustible

### Matières ou déchets ?

#### ➤ Des définitions spécifiques qui conditionnent le débat

→ Pour comparer les déchets et les matières, on utilise la radiotoxicité qui quantifie les impacts d'une exposition des populations



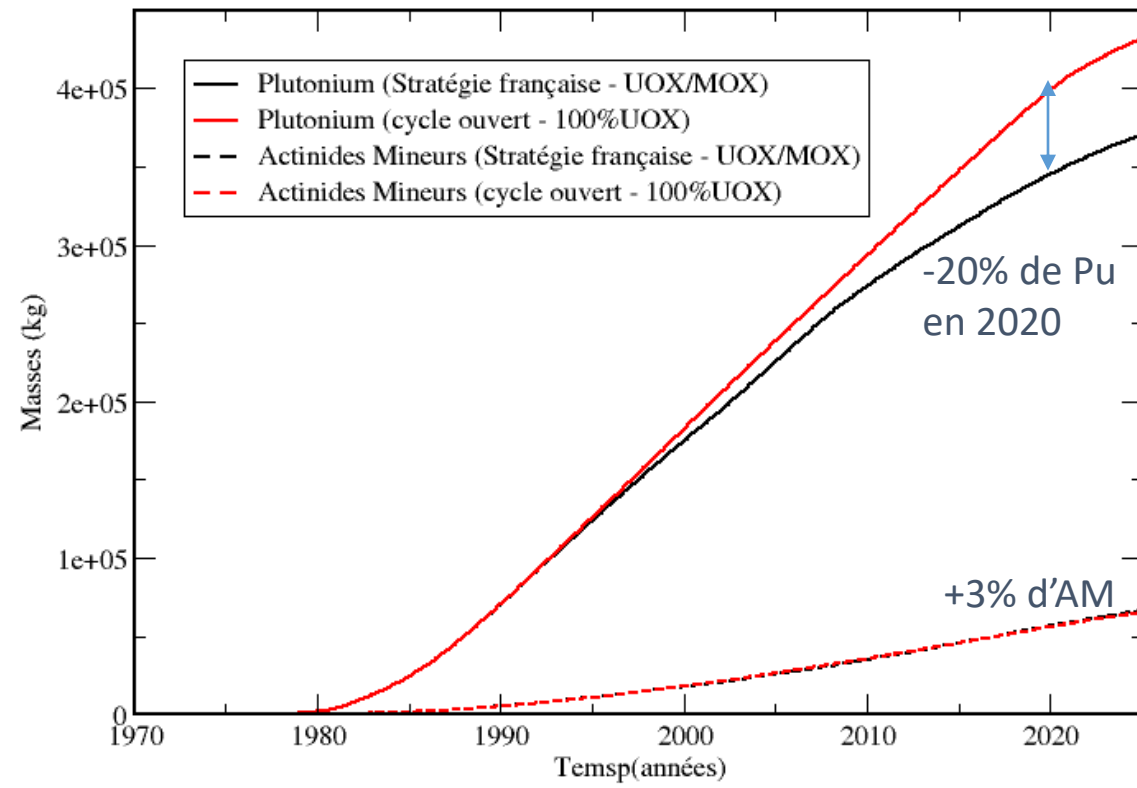
# II/ Le cycle du combustible

## Les conséquences du recyclage du plutonium



- L'utilisation du MOX comme réduction du plutonium ou des déchets ?
  - Le parc est conçu pour retraiter l'ensemble des UOX usés
  - ~18 tranches - **REP900** - **MOXés** (autorisé) à 30% **soit environ 10% des assemblages du parc**

Evolution des matières dans le parc français



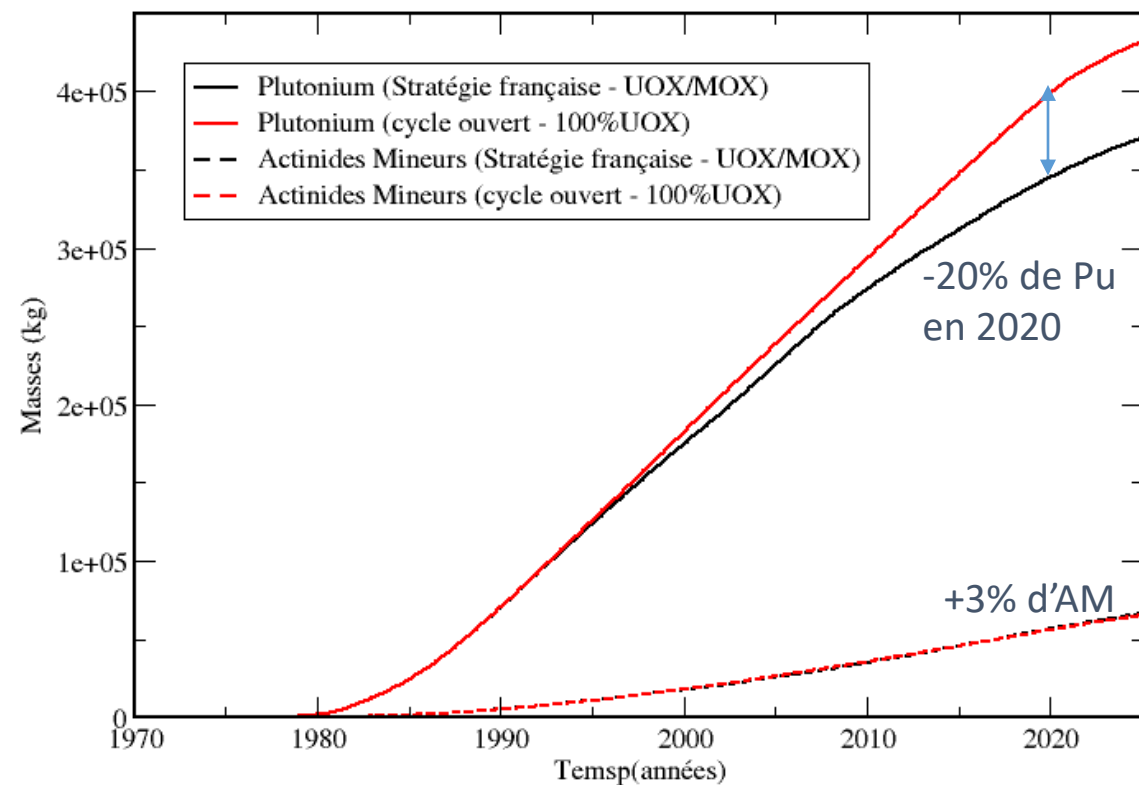
# II/ Le cycle du combustible

## Les conséquences du recyclage du plutonium

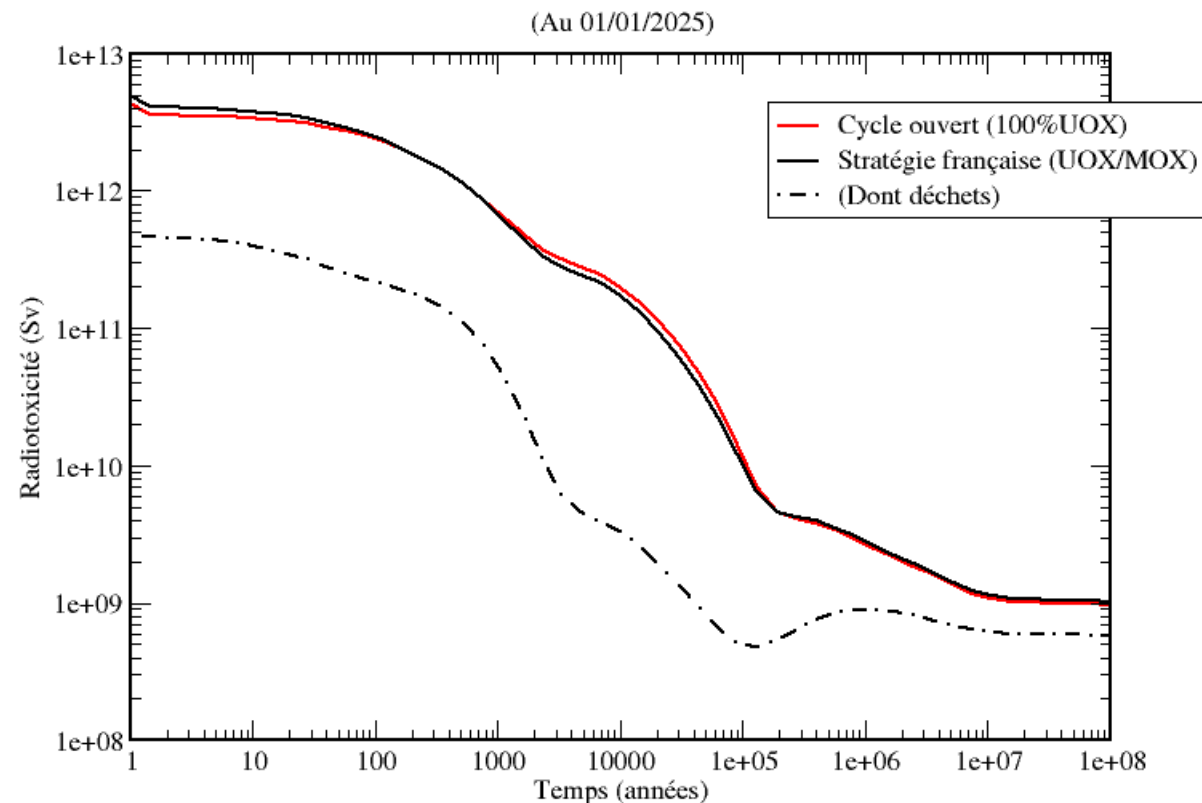


- L'utilisation du MOX comme réduction du plutonium ou des déchets ?
  - Le parc est conçu pour retraiter l'ensemble des UOX usés
  - ~18 tranches - **REP900** - **MOXés** (autorisé) à 30% soit environ **10%** des assemblages du parc

Evolution des matières dans le parc français



Radiotoxicité des matières et déchets pour le parc Français



L'intérêt du MOX n'est pas de réduire la problématique de la radiotoxicité



# II/ Le cycle du combustible

## Le stockage des déchets

### PROJET CIGÉO

CENTRE INDUSTRIEL  
DE STOCKAGE RÉVERSIBLE  
PROFOND DE DÉCHETS  
RADIOACTIFS  
EN MEUSE/Haute-MARNE

LE DOSSIER DU MAÎTRE D'OUVRAGE  
DÉBAT PUBLIC DU 19 MAI AU 19 OCTOBRE 2013



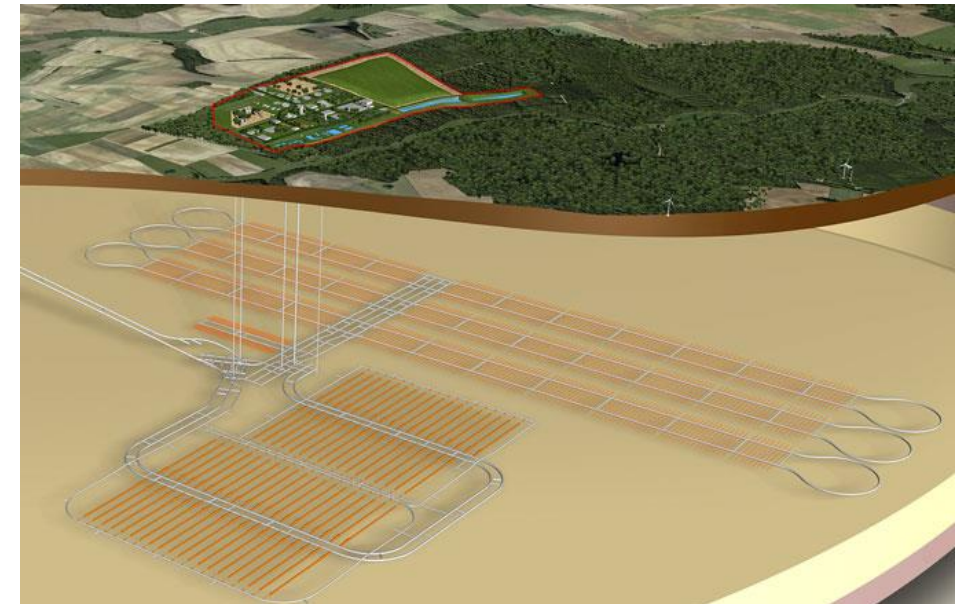
L'inventaire de CIGÉO :

|       | Déjà engagé*          | Après 40 ans avec retraitement | Après 40 ans sans retraitement | Capacité CIGÉO              |
|-------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| HA-VL | 5 700 m <sup>3</sup>  | 8 000 m <sup>3</sup>           | 93 500 m <sup>3</sup>          | <b>10 000 m<sup>3</sup></b> |
| MA-VL | 57 500 m <sup>3</sup> | 67 500 m <sup>3</sup>          | 59 000 m <sup>3</sup>          | <b>70 000 m<sup>3</sup></b> |

\*déjà produit, issu du démantèlement ou issu du traitement des combustibles usés

- **CIGÉO ne concerne que** les déchets produits et « à produire » des **réacteurs actuels** (*en supposant qu'on continue à produire des déchets*)
- 60 % des MA-VL et 30% des HA-VL de CIGÉO sont déjà produits

La surface total représente environ 15 km<sup>2</sup> à terme



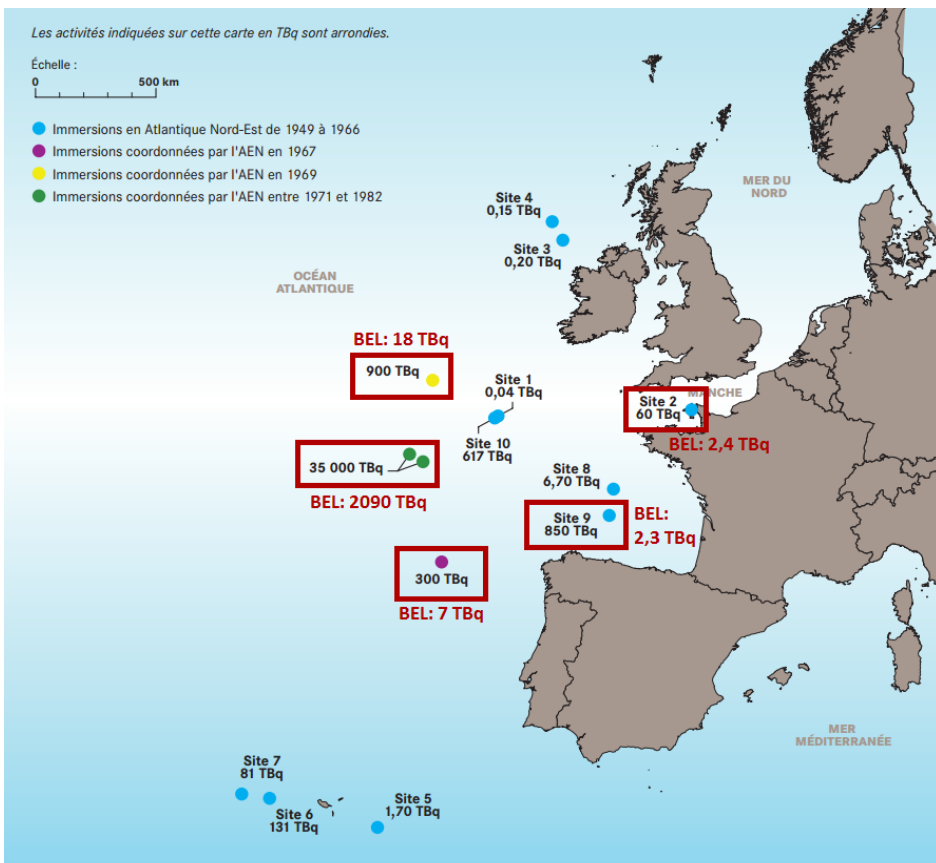
- 5% du total des déchets HA seront installé en 2025 dans CIGÉO pour observation pendant 50 ans.
- Le stockage des HA ne débutera donc pas avant 2075 !

## II/ Le cycle du combustible

### Le stockage des déchets – une problématique qui n'est pas nouvelle

➤ La France (comme tous les pays nucléarisés) a participé à des campagnes d'immersions de déchets nucléaires (avant la convention de Londres - 1975)

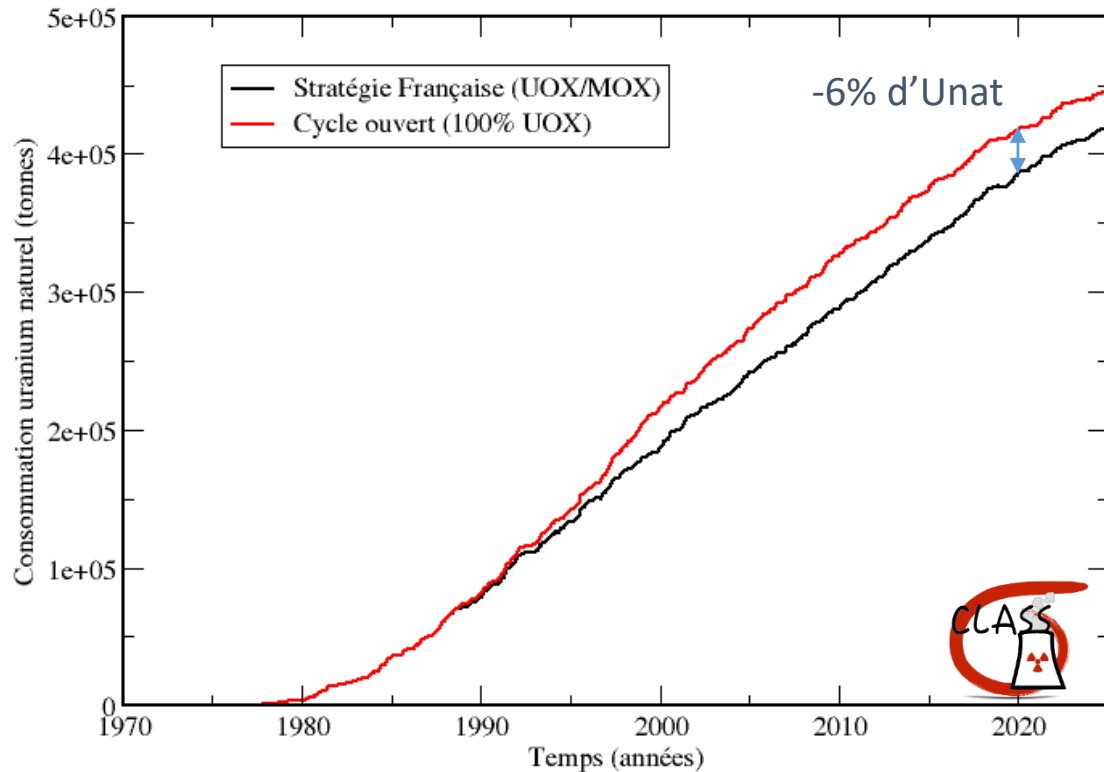
→ *Changement total de philosophie : on passe d'une stratégie de dilution à une stratégie de concentration*



# II/ Le cycle du combustible

## L'économie d'uranium

- L'utilisation du **MOX** a permis d'économiser entre **6 et 7% de l'uranium**
  - Faible production de plutonium dans les REP  
*conséquence du spectre thermique*
  - Même économie possible avec le recyclage de l'uranium

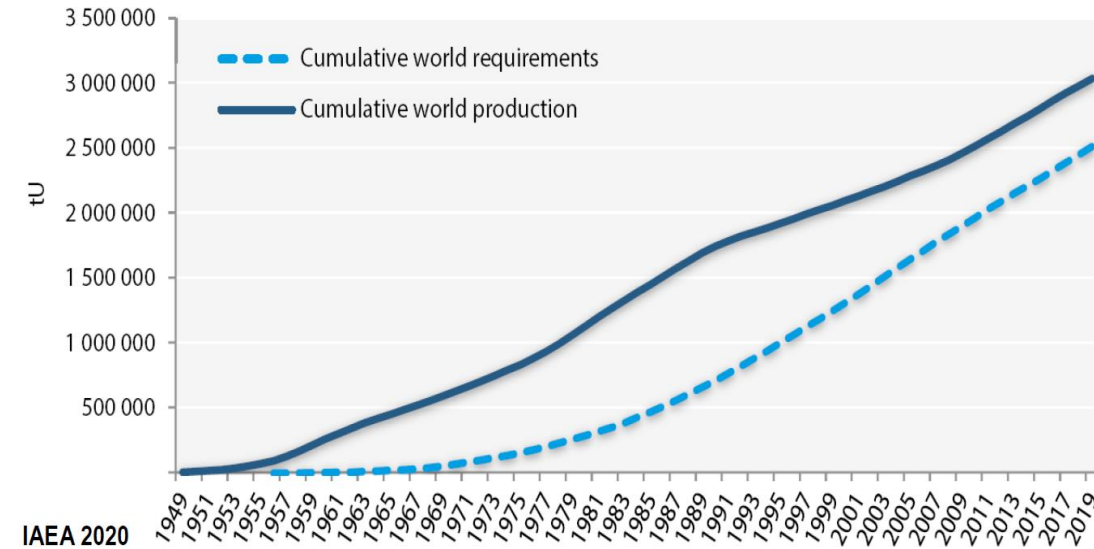


- Etats des ressources mondiales (conventionnelles) :

|   | < 260 \$Kg |
|---|------------|
| « Reasonably Assured Ressources » (RAR) | 4 723 kt   |
| « Inferred Ressources » (IR)            | 3 346 kt   |
| Undiscovered resources                  |            |
| « Prognosticated Ressources » (PR)      | 1 606 kt   |
| « Speculative Ressources » (SR)         | 3 756 kt   |

- ➔ *Ressources non-conventionnelles (co-extraction) :*

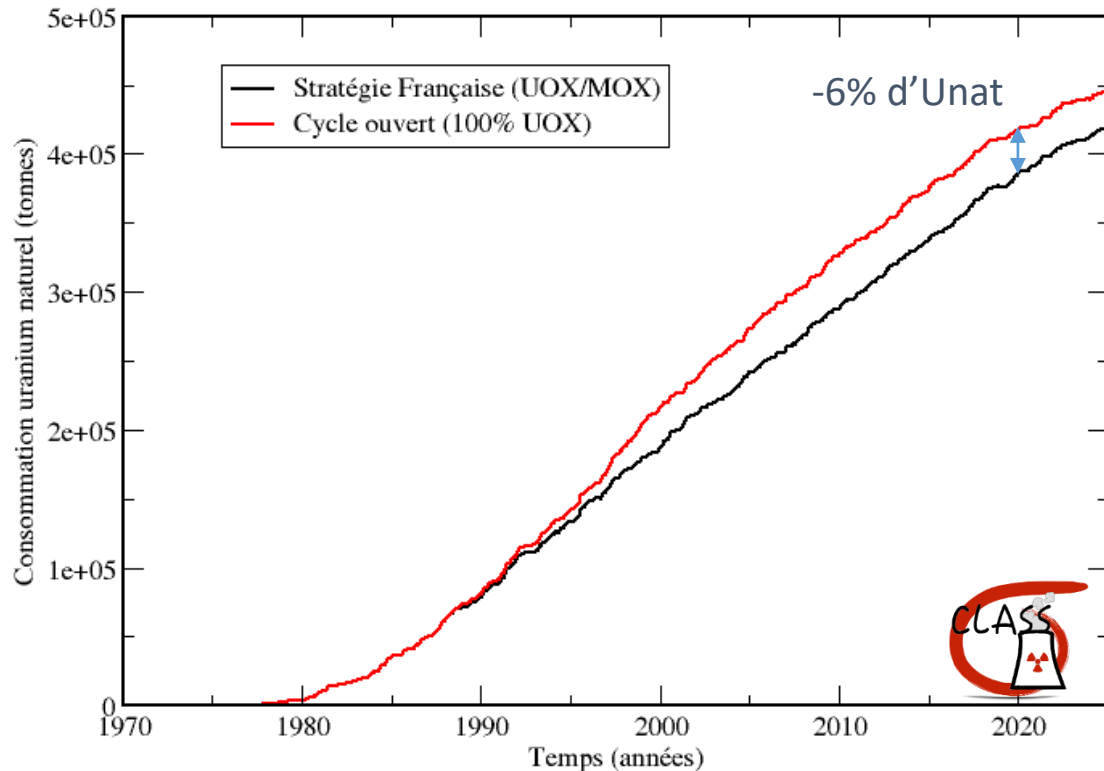
- Phosphates ~ 9 000 kt
- Autres ~ 22 000 kt (cités dans le livre rouge AIEA)



# II/ Le cycle du combustible

## L'économie d'uranium

- L'utilisation du **MOX** a permis d'économiser entre **6 et 7% de l'uranium**
  - ➔ Faible production de plutonium dans les REP  
*conséquence du spectre thermique*
  - ➔ Même économie possible avec le recyclage de l'uranium



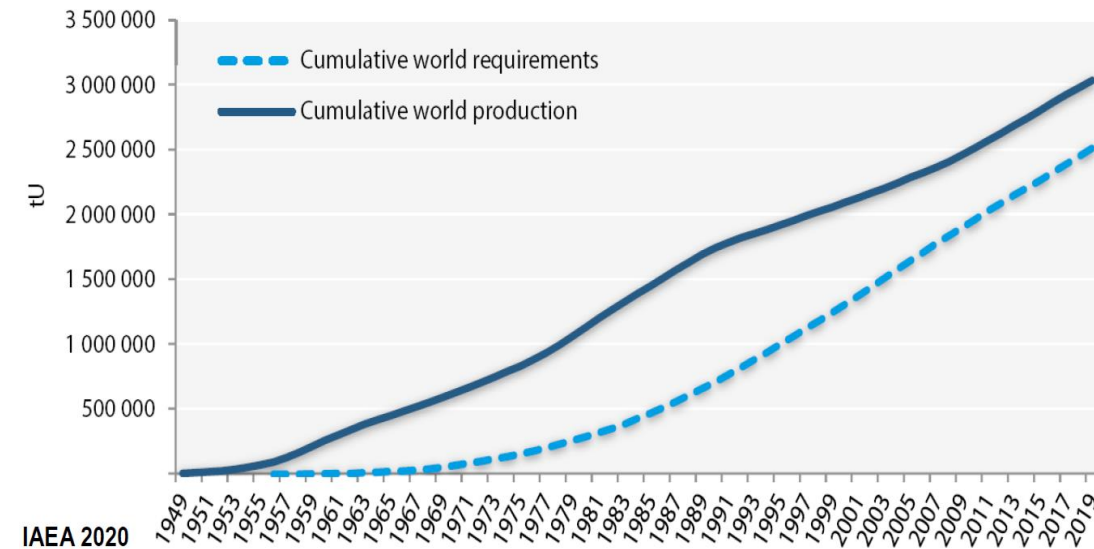
« Des **ressources suffisantes** en uranium ont été **identifiés** pour soutenir les **scénarios de déploiement** du nucléaire au niveau mondial **les plus agressifs**, mais très peu de mines sont compétitifs au prix actuel » *Michel Cuney, (JA, GDR SciNEE)*

- Etats des ressources mondiales (conventionnelles) :

|   | < 260 \$Kg |
|---|------------|
| « Reasonably Assured Ressources » (RAR) | 4 723 kt   |
| « Inferred Ressources » (IR)            | 3 346 kt   |
| Undiscovered resources                  |            |
| « Prognosticated Ressources » (PR)      | 1 606 kt   |
| « Speculative Ressources » (SR)         | 3 756 kt   |

- ➔ *Ressources non-conventionnelles (co-extraction) :*

- Phosphates ~ 9 000 kt
- Autres ~ 22 000 kt (cités dans le livre rouge AIEA)



## ➤ *Ce qu'on peut retenir*

- L'énergie nucléaire produit des déchets qui sont aujourd'hui vitrifiés et entreposés en attente d'un stockage géologique
- Le plutonium n'est pas considéré comme un déchet mais comme une matière valorisable
- Il représente pourtant la majorité de la radiotoxicité à long terme des matières produites en réacteur
- Le recyclage du plutonium sous forme de MOX ne réduit pas la radiotoxicité et permet une faible économie d'uranium

1. Fonctionnement des réacteurs

2. Le cycle du combustible Français

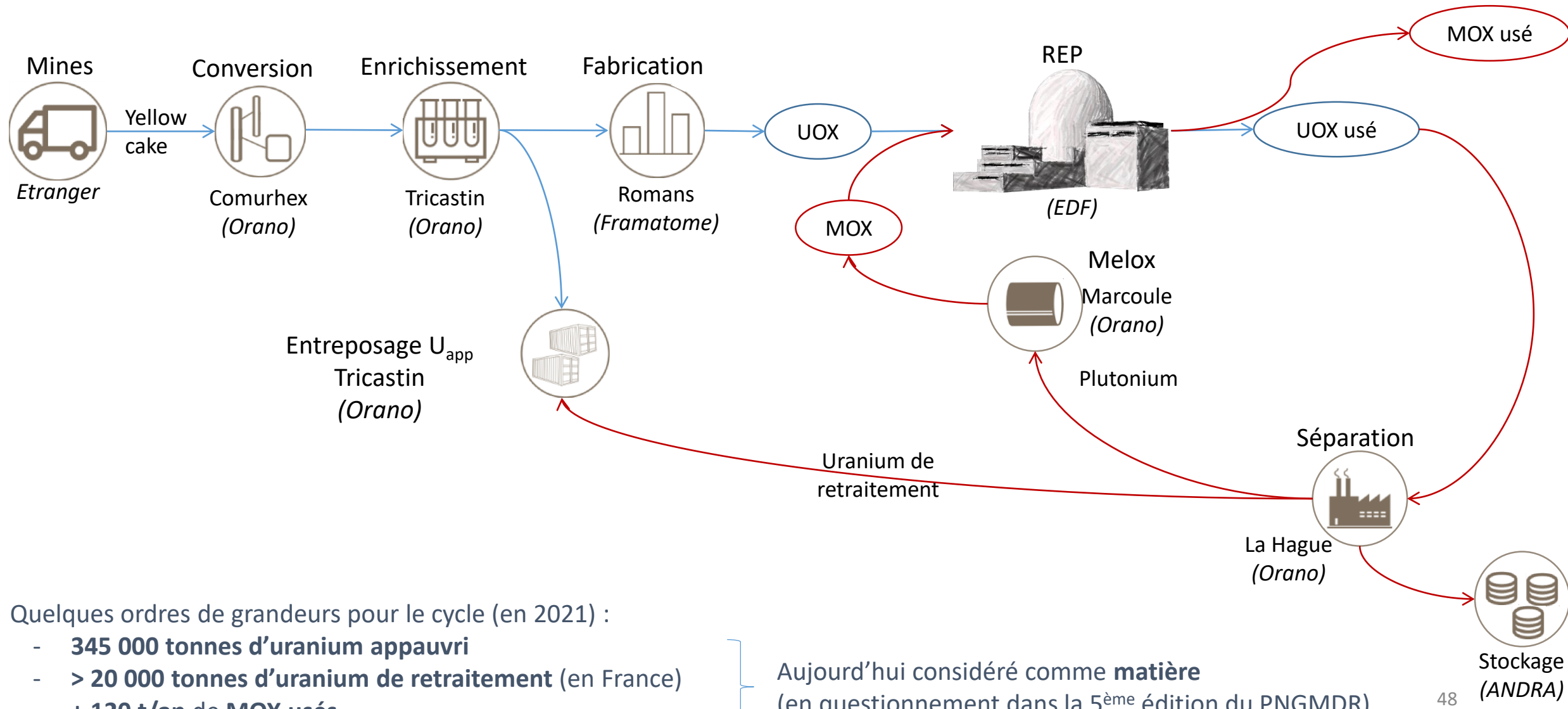
**3. Les enjeux pour le parc à l'échéance 2050**

- ✓ **La « crise » des piscines**
- ✓ **Le moxage des REP 1300**
- ✓ **Le Multi-recyclage du plutonium**
- ✓ **EPR vs EPR2**
- ✓ **CIGEO : projet de stockage des déchets HA-VL**

4. Les enjeux pour le parc à l'échéance 2090

# III/ Les enjeux pour le parc

## Quelques points durs



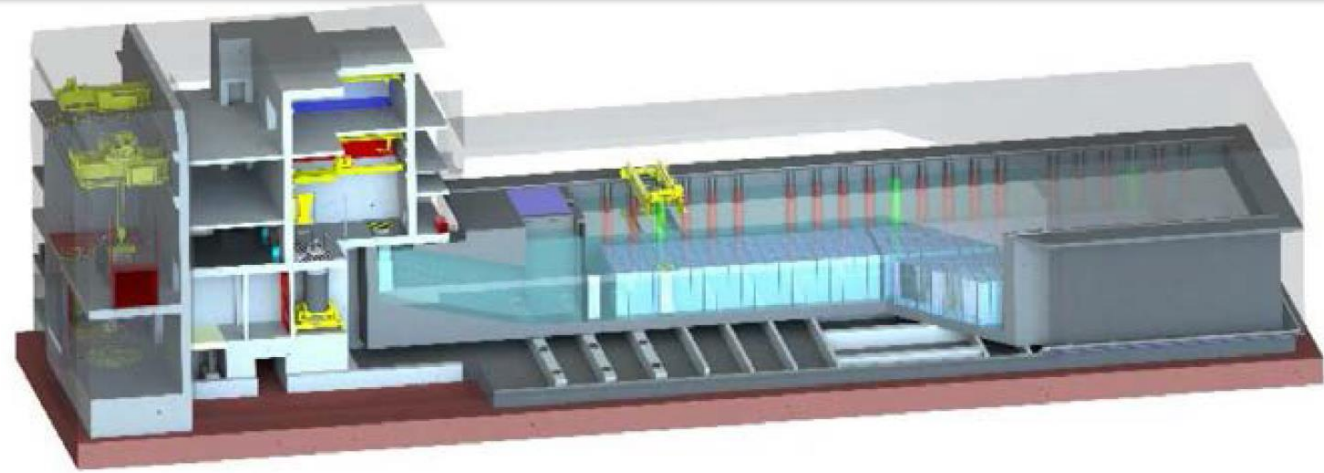
- Quelques ordres de grandeurs pour le cycle (en 2021) :
  - **345 000 tonnes d'uranium appauvri**
  - **> 20 000 tonnes d'uranium de retraitement (en France)**
  - **+ 120 t/an de MOX usés**

Aujourd'hui considéré comme **matière**  
 (en questionnement dans la 5<sup>ème</sup> édition du PNGMDR)

### III/ Les enjeux pour le parc

#### La « crise » des piscines

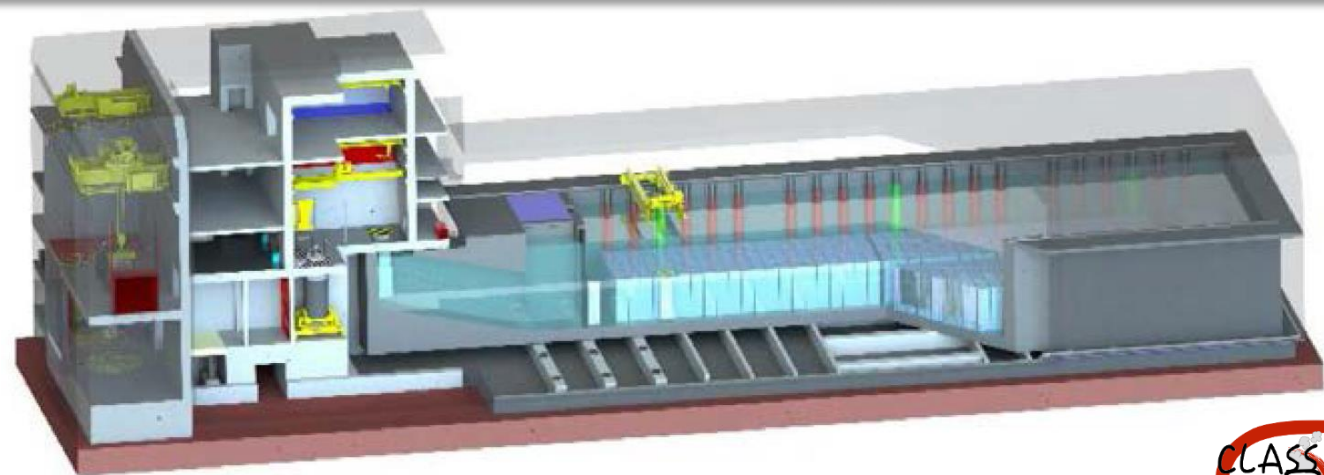
- **Saturation des piscines d'ici 2030** (estimé en 2018)
  - 2018 : Début du projet de nouvelle piscine
  - Amélioration de la sûreté :
    - Chute d'avion*
    - Aléas climatique « extrême »*
  - Durée d'exploitation > 100 ans
  
- La piscine ne sera pas en exploitation avant 2034 !



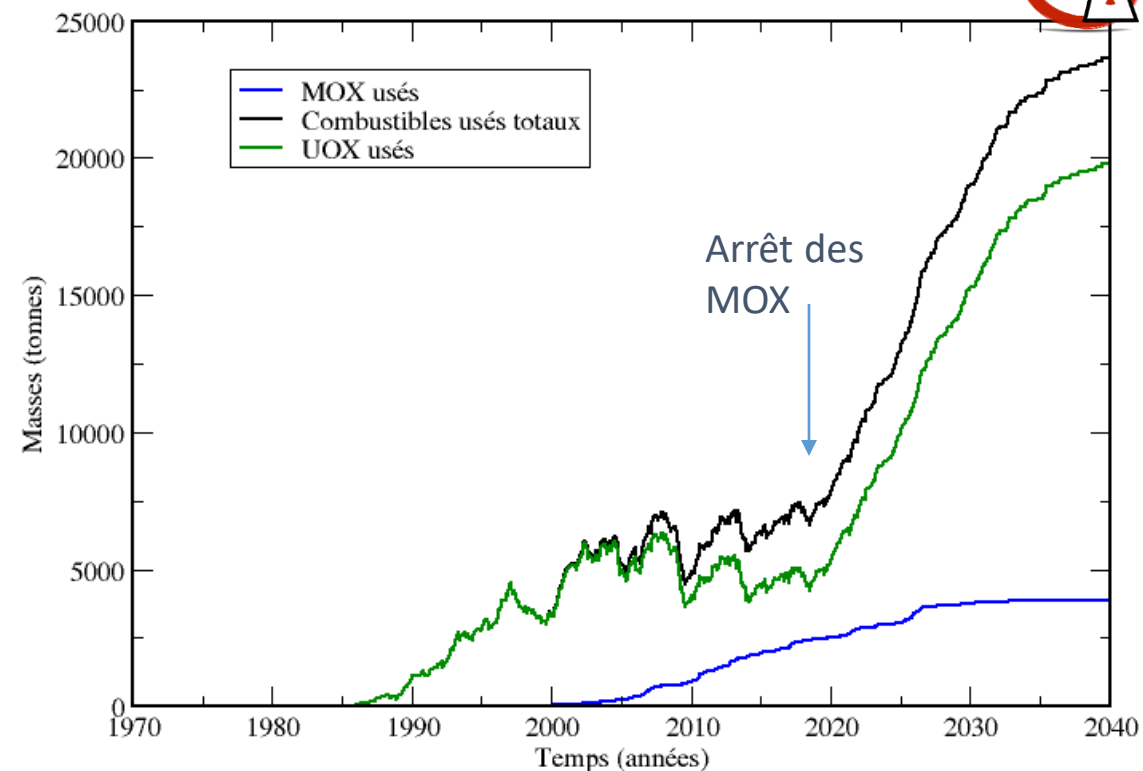
# III/ Les enjeux pour le parc

## La « crise » des piscines

- **Saturation des piscines d'ici 2030** (estimé en 2018)
  - 2018 : Début du projet de nouvelle piscine
  - Amélioration de la sûreté :
    - Chute d'avion*
    - Aléas climatique « extrême »*
  - Durée d'exploitation > 100 ans
- La piscine ne sera pas en exploitation avant 2034 !



- Mais la PPE prévoit l'arrêt de réacteurs
  - 20 tranches autorisés à recevoir du combustible MOX
  - REP 900 (CPY) démarrés entre 1980 et 1987**
  - *Fin du retraitement d'une partie des assemblages UOX*
- La **saturation** des piscines arrivera **avant 2030**
  - **Densification des piscines de la Hague** (dossier en cours)
  - **Entreposage à sec**
  - **Augmentation de l'utilisation du plutonium**
    - Moxage des REP 1300**
    - Recyclage des MOX usés**

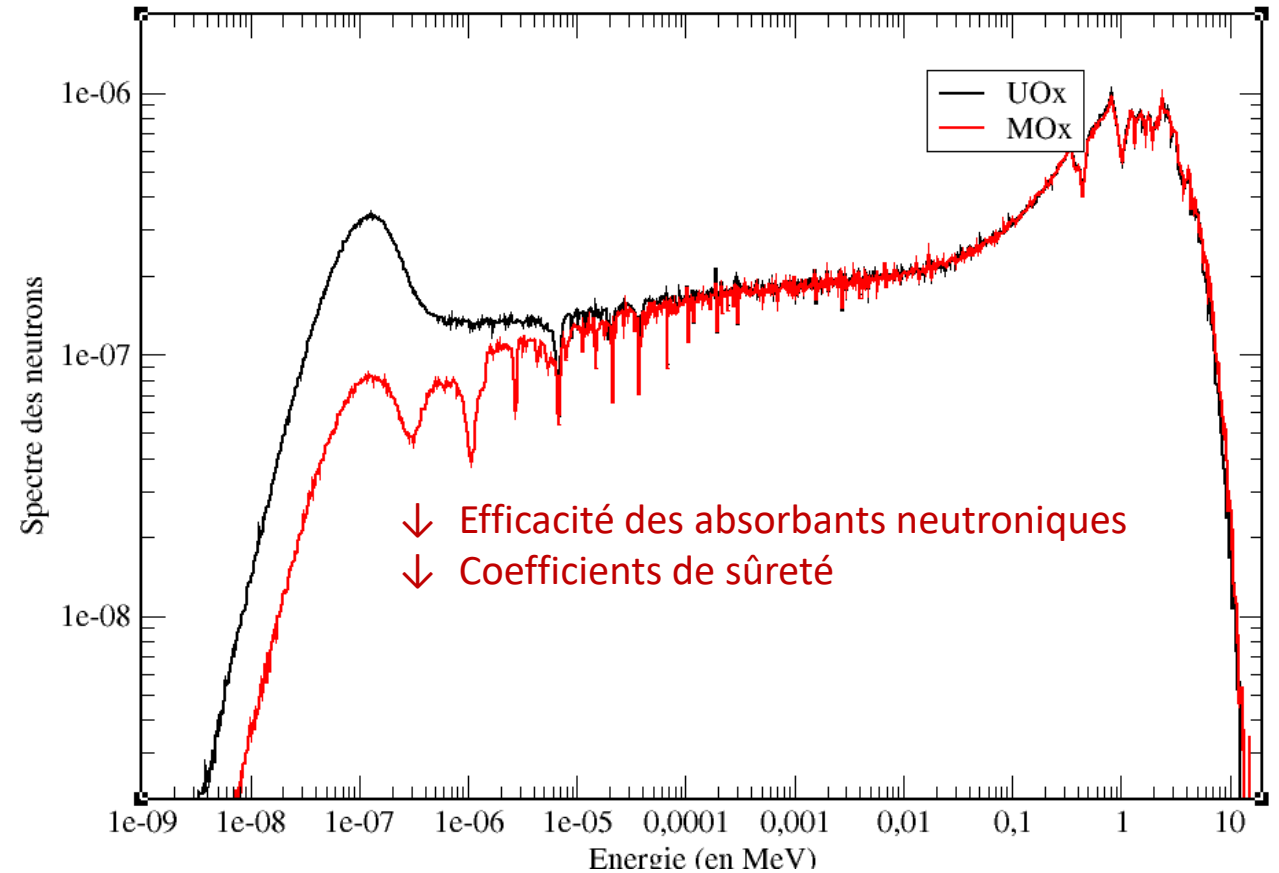
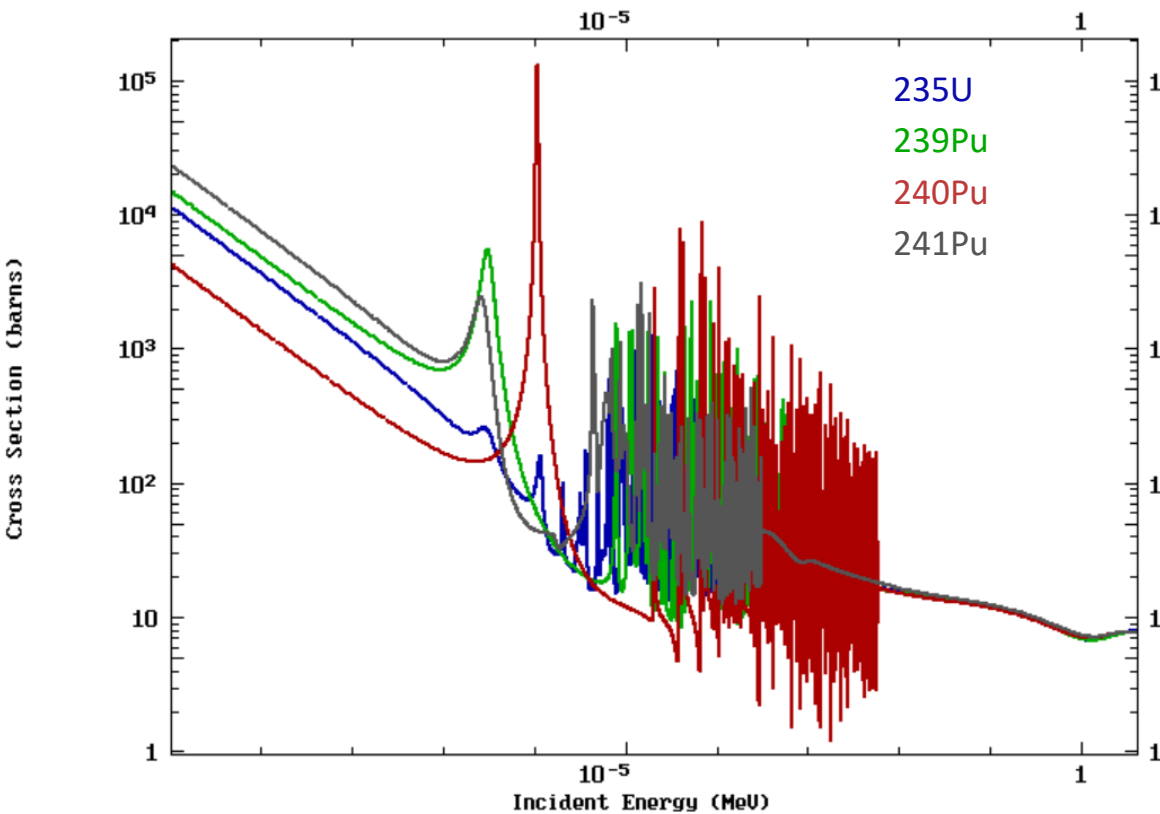
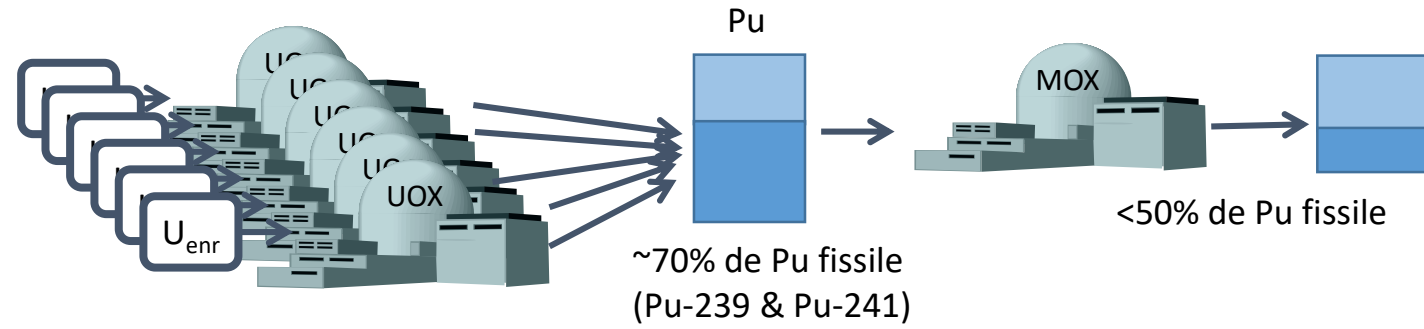




# III/ Les enjeux pour le parc

## Les difficultés liés au MOX

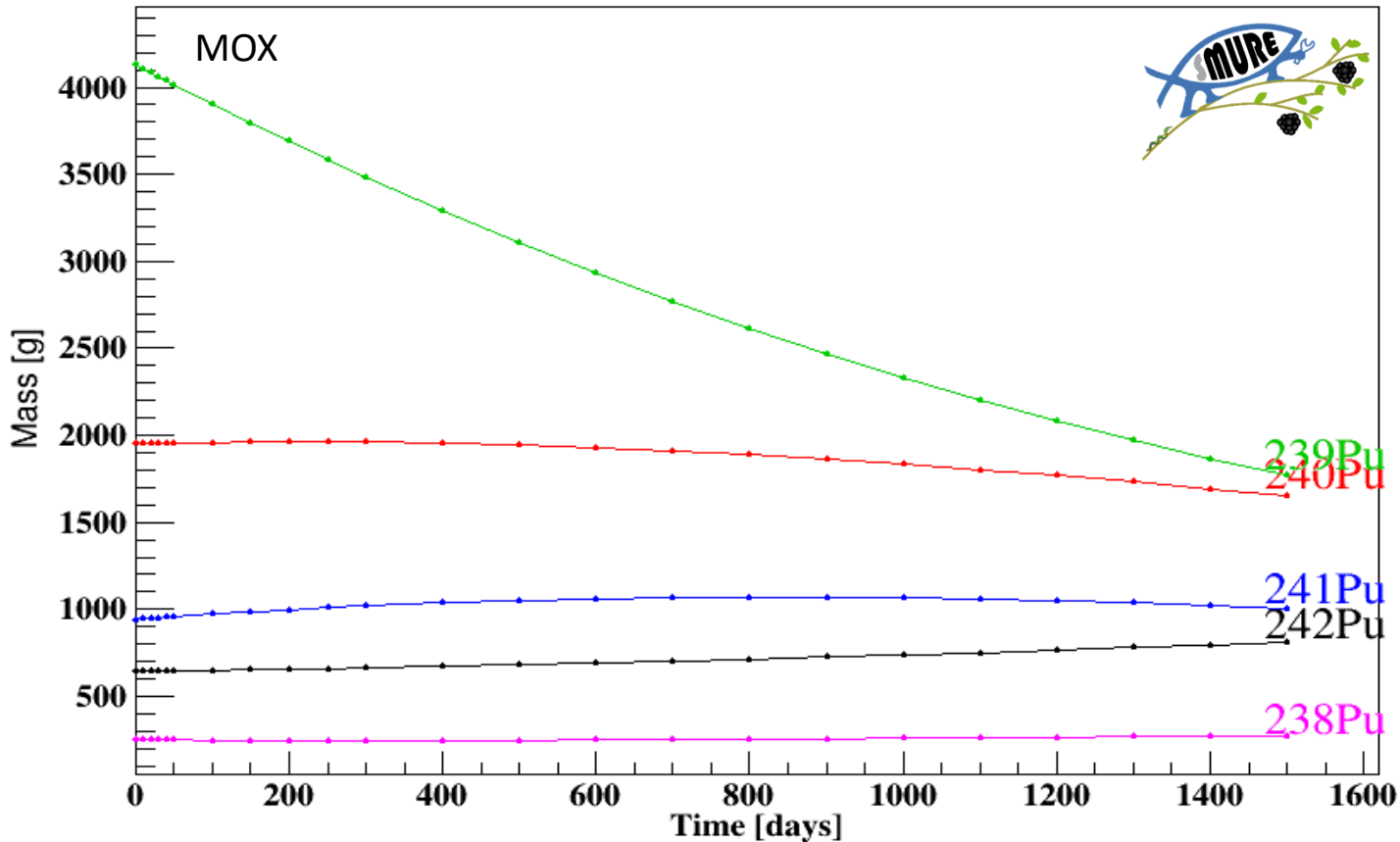
- A cause des isotopes pairs du plutonium, il faut **~7-9%** de **plutonium** dans les combustibles **MOX**
  - ➔ *Concentration du plutonium*
  - ➔ *Spectre neutronique (beaucoup) plus rapide*



### III/ Les enjeux pour le parc

#### Les difficultés liées au MOX

➤ Le passage du plutonium en réacteur dégrade fortement son isotopie :



→ On brûle essentiellement du plutonium 239

⇒ dégradation forte de la qualité

⇒ Augmentation de la teneur pour un nouveau passage en réacteur

⇒ dégradation des coefficients de sûreté

➤ Mais la valorisation des **MOX** est **nécessaire** pour que ceux ne soit **pas considéré comme des déchets** (5<sup>ème</sup> PNGMDR)

➤ Et les **REP** sont les **seuls réacteurs** existants à court/moyen terme **pour une utilisation du plutonium**

➤ **Nécessité de mélanger le plutonium avec de l'uranium enrichi (ou avec du « bon » plutonium)**

→ Nombreuses modifications pour les réacteurs et le cycle

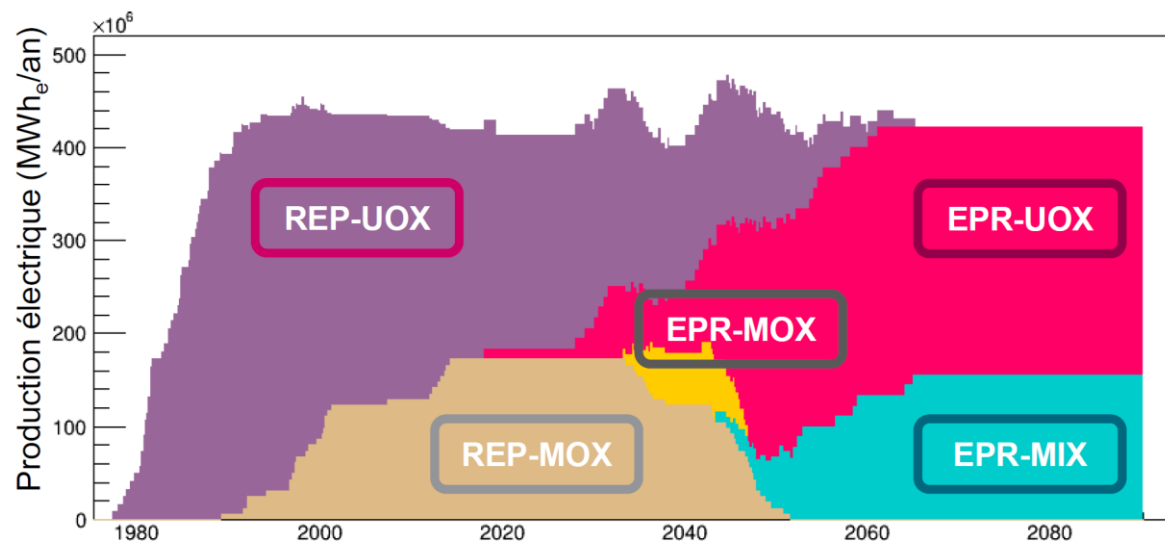
→ Assemblage de test à l'horizon 2028 pour un déploiement industriel à l'horizon 2050

# III/ Les enjeux pour le parc

## Le multi-recyclage Pu en REP

➤ Pour répondre aux problématiques, la filière « nucléaire » imagine des scénarios de multi-recyclage !

- Saturation des piscines
- Volonté de retraitement des combustibles MOX usés

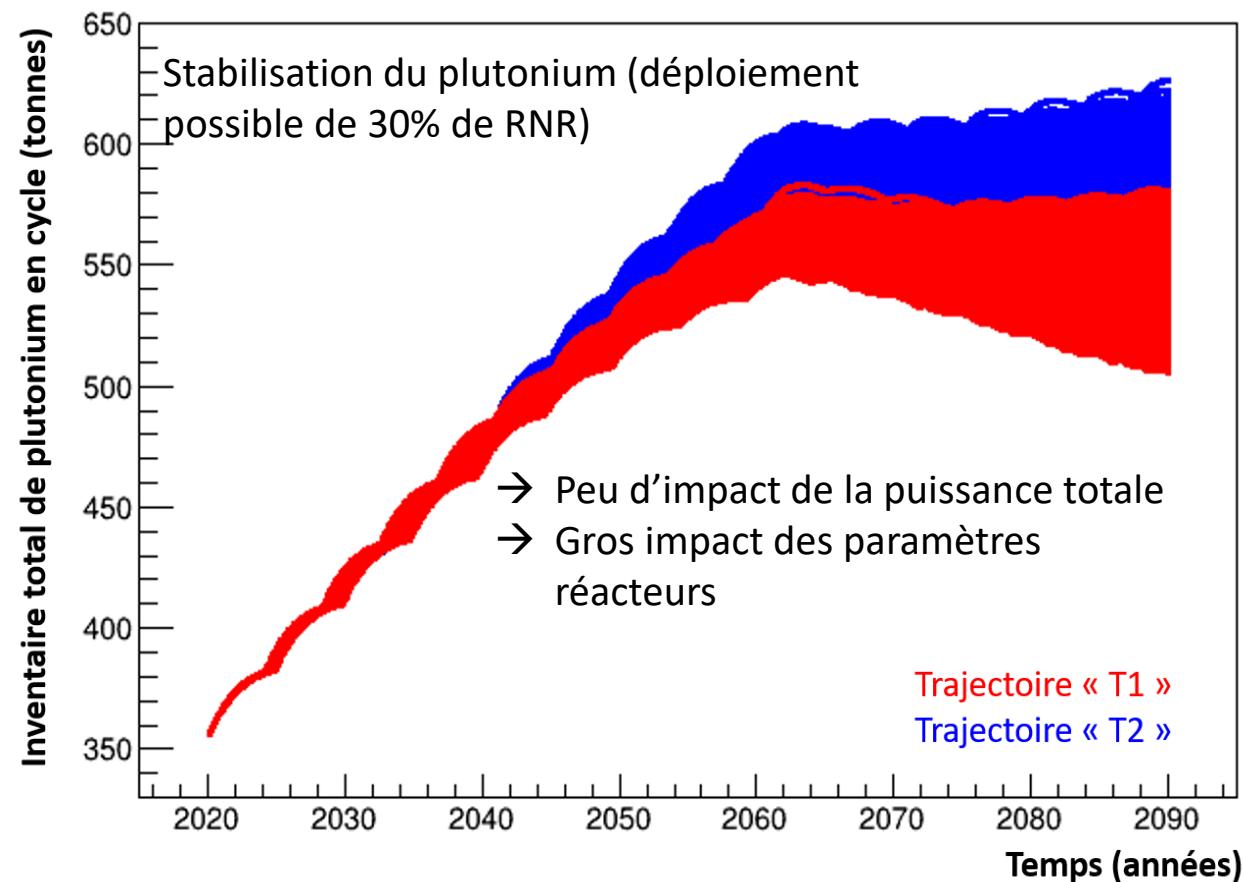


→ Objectifs :

- Stabiliser les inventaires de **plutonium** globaux
- Stabiliser les combustibles usés (place dans les piscines)

→ Hypothèses :

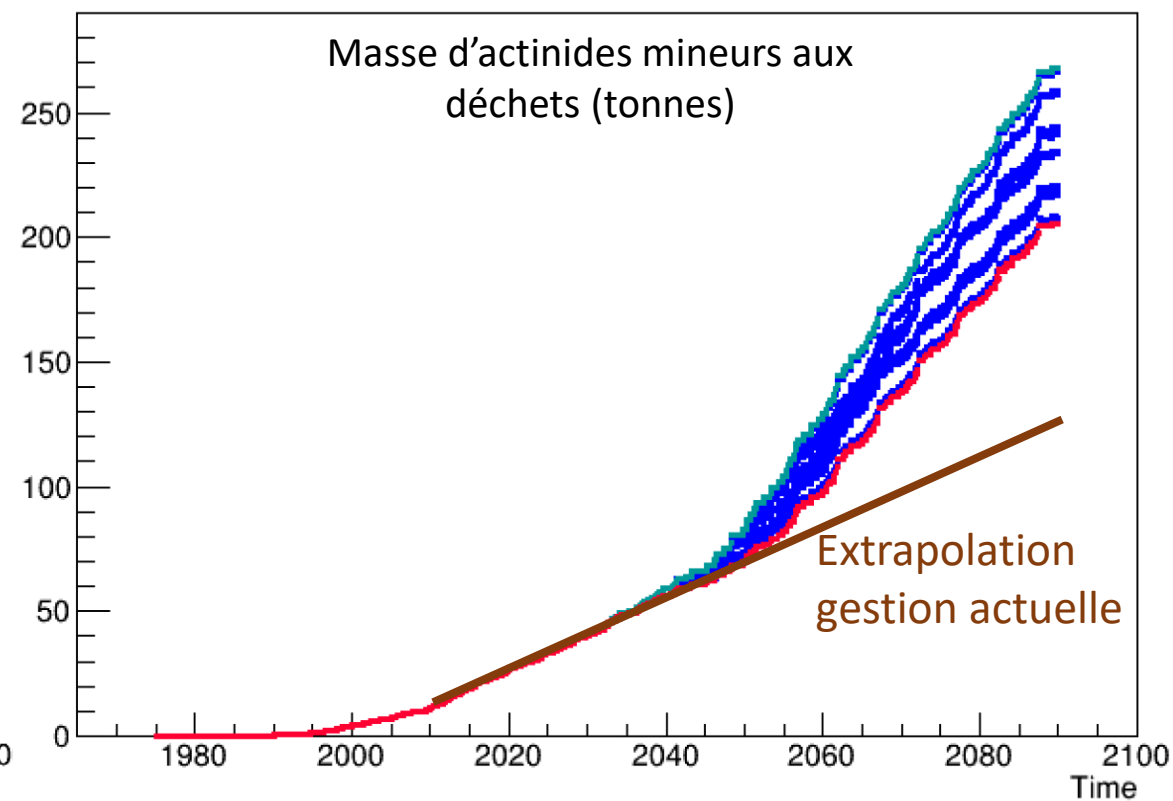
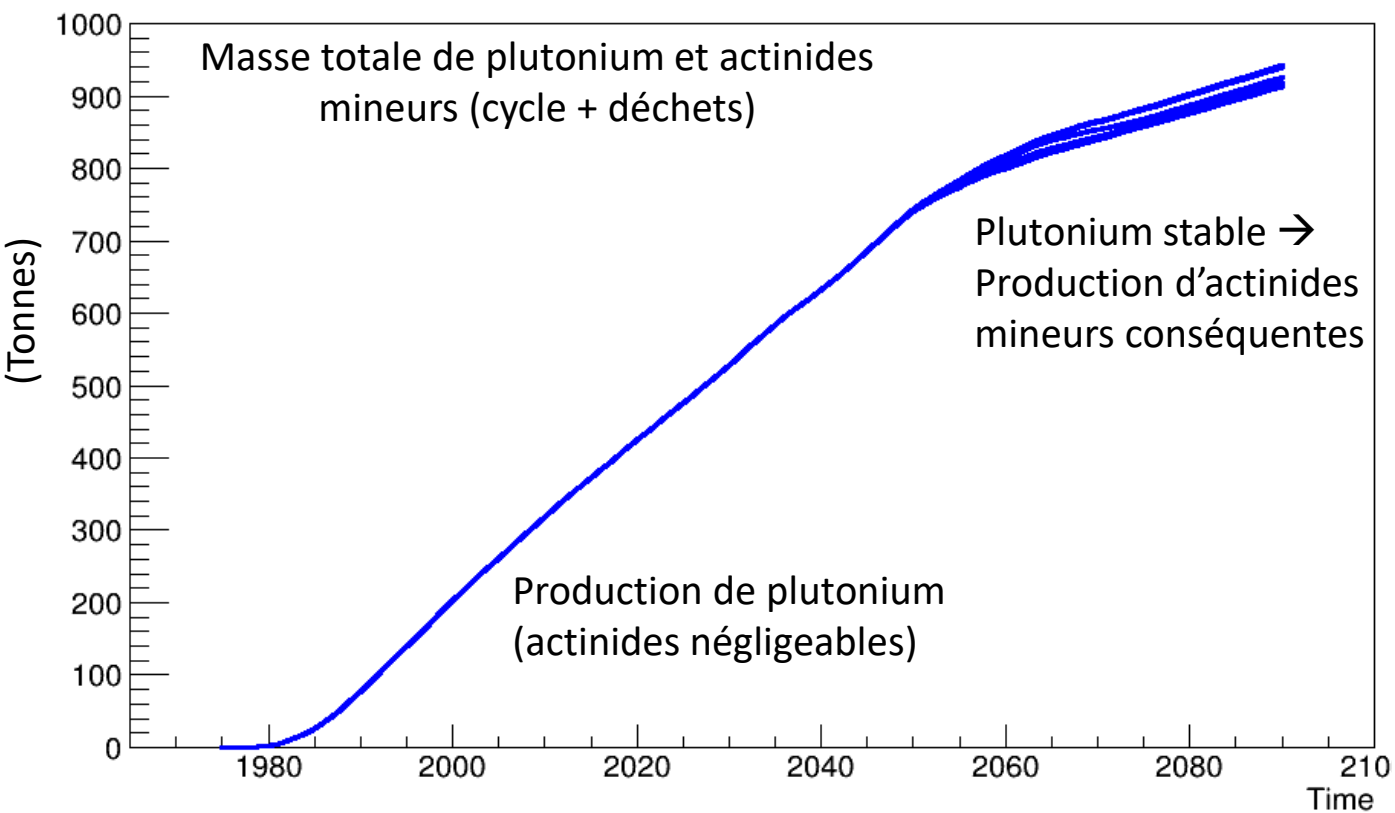
- Flux de matières (combustibles à retraiter en priorité)
- Paramètres réacteurs (temps d'irradiation)
- *Puissance finale !*



### III/ Les enjeux pour le parc

#### Les impacts d'une telle stratégie

- Le plutonium issu des MOX usé est de trop mauvaise qualité (pas assez de fissile)
  - Besoin de le mélanger à de l'uranium enrichi
  - Production accrue d'actinides mineurs !

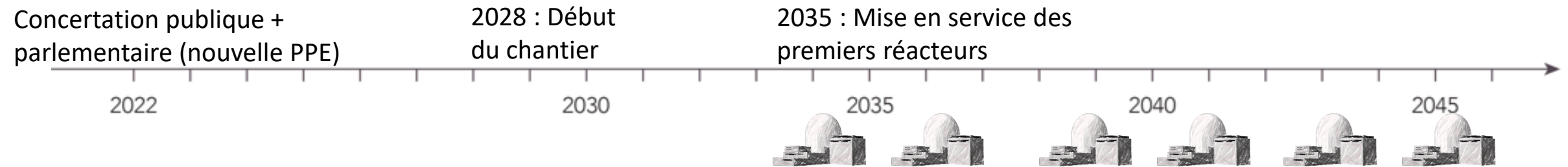


# III/ Les enjeux pour le parc EPR2

- 10 Février 2022 : Engagement de 6 EPR2 (+ 8 à l'étude)

> 10 ans entre la prise de décision et la mise en service

→ *Ce délai incompressible (et très optimiste) justifie l'extension de la durée de vie des réacteurs existants*



- **EPR2 = EPR mais moins cher !**

- Simplification du génie civil
- Normalisation des équipements (notamment hydraulique)

} Réduction du coût

- **Suppression de l'option maintenance en puissance**
- **Abandon de l'option d'entrée dans le bâtiment réacteur en puissance**

} **Simplification de la maintenance**

- Construction par paire

- Préfabrication en usine et modularité pour réduire les temps de construction et interface sur le chantier

} Simplification du chantier

- Le challenge EPR est avant tout un challenge financier

- Les coûts du nucléaires sont portés par les coûts du capital

## ➤ *Ce qu'on peut retenir*

- Les prochaines décennies vont justifier des développements de R&D très concrets
- La stratégie de référence est aujourd'hui une stratégie d'attente vis-à-vis du statut du plutonium
  - *On garde du Pu si jamais on veut profiter de cette matière dans les combustibles usés*
  - *On évite d'accumuler le plutonium en cherchant sa stabilisation dans les stocks de combustibles usés.*

1. Fonctionnement des réacteurs

2. Le cycle du combustible Français

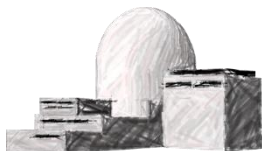
3. Les enjeux pour le parc à l'échéance 2050

**4. Les enjeux pour le parc à l'échéance 2090**

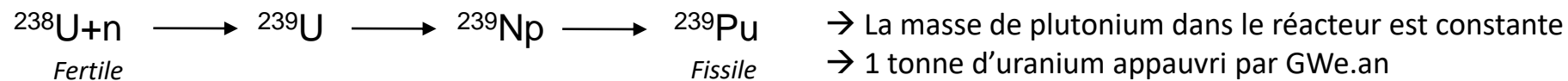
- ✓ **Le multi-recyclage dans les systèmes rapides et la fermeture du cycle**
- ✓ **La transmutation des actinides mineurs**
- ✓ **Les RNR-Na et les autres systèmes de GEN IV**

# IV/ Les enjeux pour le parc à l'horizon 2090

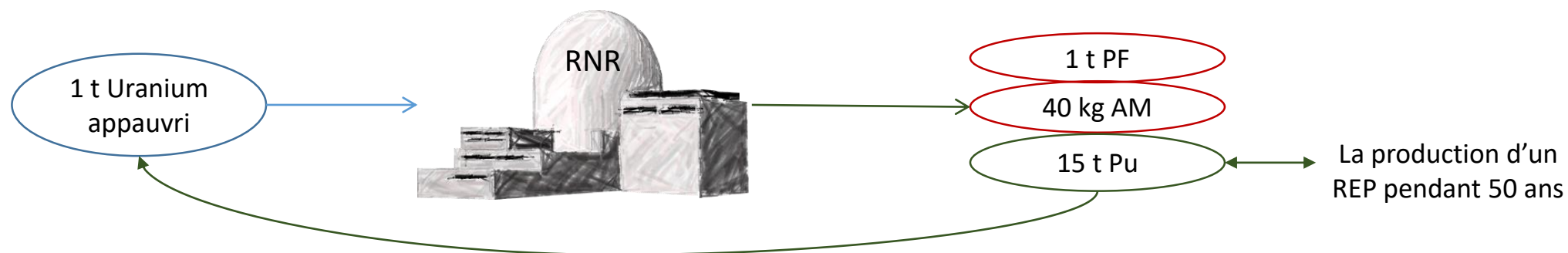
## Vers la régénération et les réacteurs à neutrons rapides



- 1 réacteur de 1 GWe = une tonne de fission par an ! = ~200 tonnes d'uranium naturel  
*Peut-on produire cette tonne de matière fissile en fonctionnement ?*



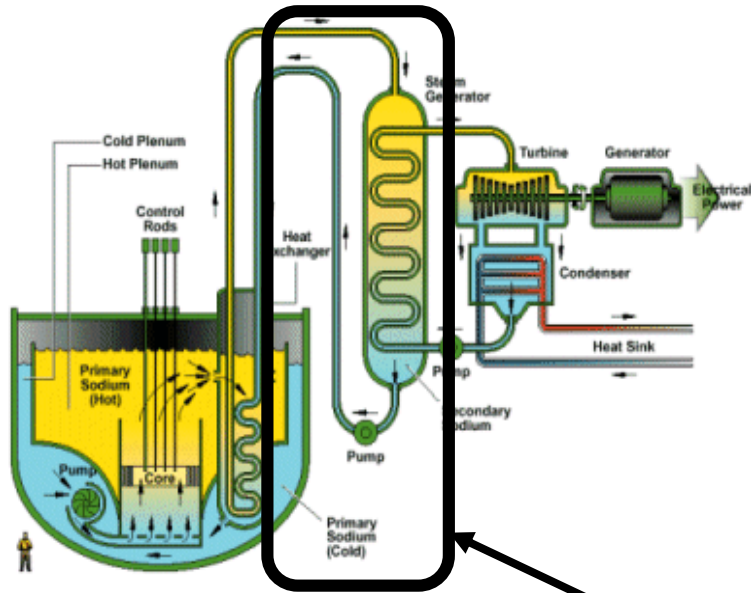
- Besoin de neutrons supplémentaires pour maintenir la production du plutonium (principe de la régénération)
  - *Impossible en spectre thermique mais accessible avec des neutrons rapides (type réacteurs refroidis au sodium (SPX))*
  - *Nécessite une masse de plutonium très importante (~12 tonnes par réacteurs)*



- Le **parc français** nécessite environ **1500 tonnes** de plutonium (contre ~**350 tonnes aujourd'hui**)
  - *Accumulation du plutonium très radiotoxique dans le cycle*
- Les ressources disponibles ne justifient pas le recours à la régénération
  - *Mais l'intérêt des RNR est peut être ailleurs : fermeture des mines, transmutation, etc...*

# IV/ Les enjeux pour le parc à l'horizon 2090

## L'exemple de superphénix



### ➤ Refroidissement : Sodium liquide

- Peu cher
- Pression atmosphérique
- Bon retour sur expérience au niveau industriel

### ➤ Mais le sodium n'est pas stable avec l'air ni l'eau

- Nécessite un échangeur supplémentaire pour les générateurs de vapeurs

### ➤ Comportement neutronique en cas d'accident différents que dans le cas des REP

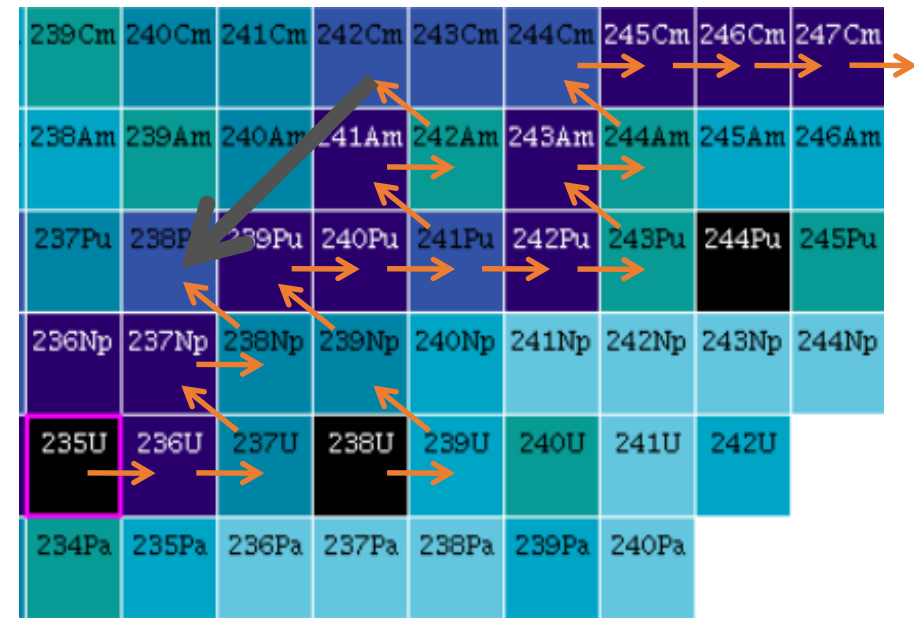
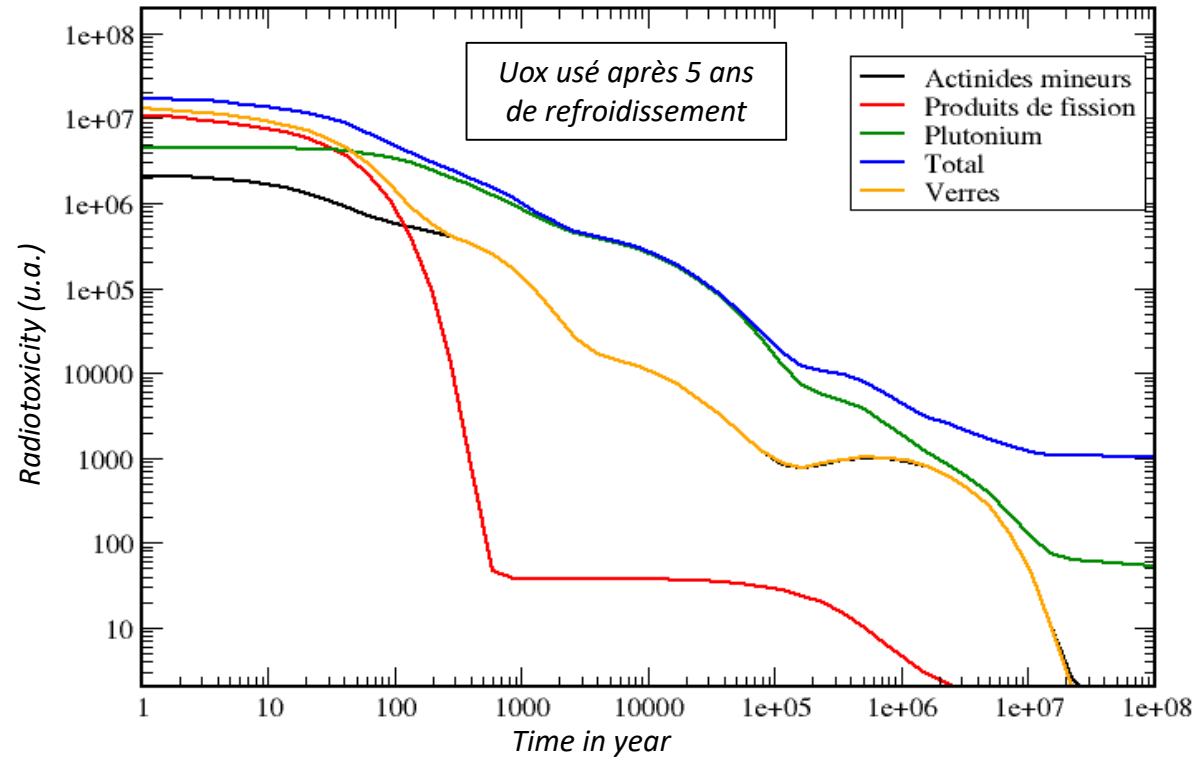
Augmentation des  
coûts de constructions

La France a plus d'expérience dans le  
démantèlement des réacteurs aux sodiums de  
1200 MW<sub>e</sub> que dans les REP actuel



# IV/ Les enjeux pour le parc à l'horizon 2090

## Les RNR pour la transmutation (en plus de la fermeture du cycle)

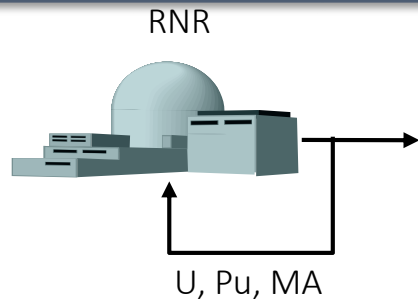


# IV/ Les enjeux pour le parc à l'horizon 2090

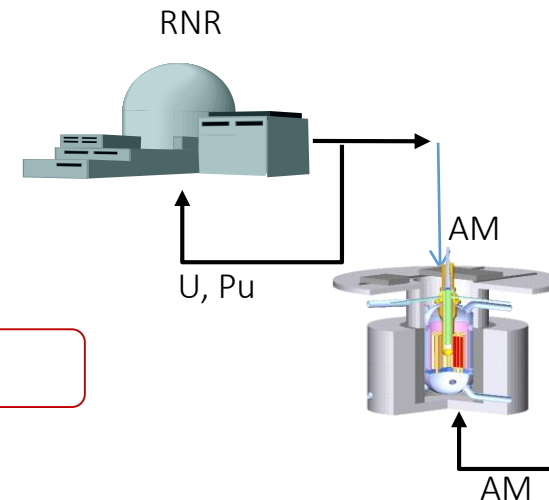
## Les RNR pour la transmutation (en plus de la fermeture du cycle)

### Deux stratégies différentes

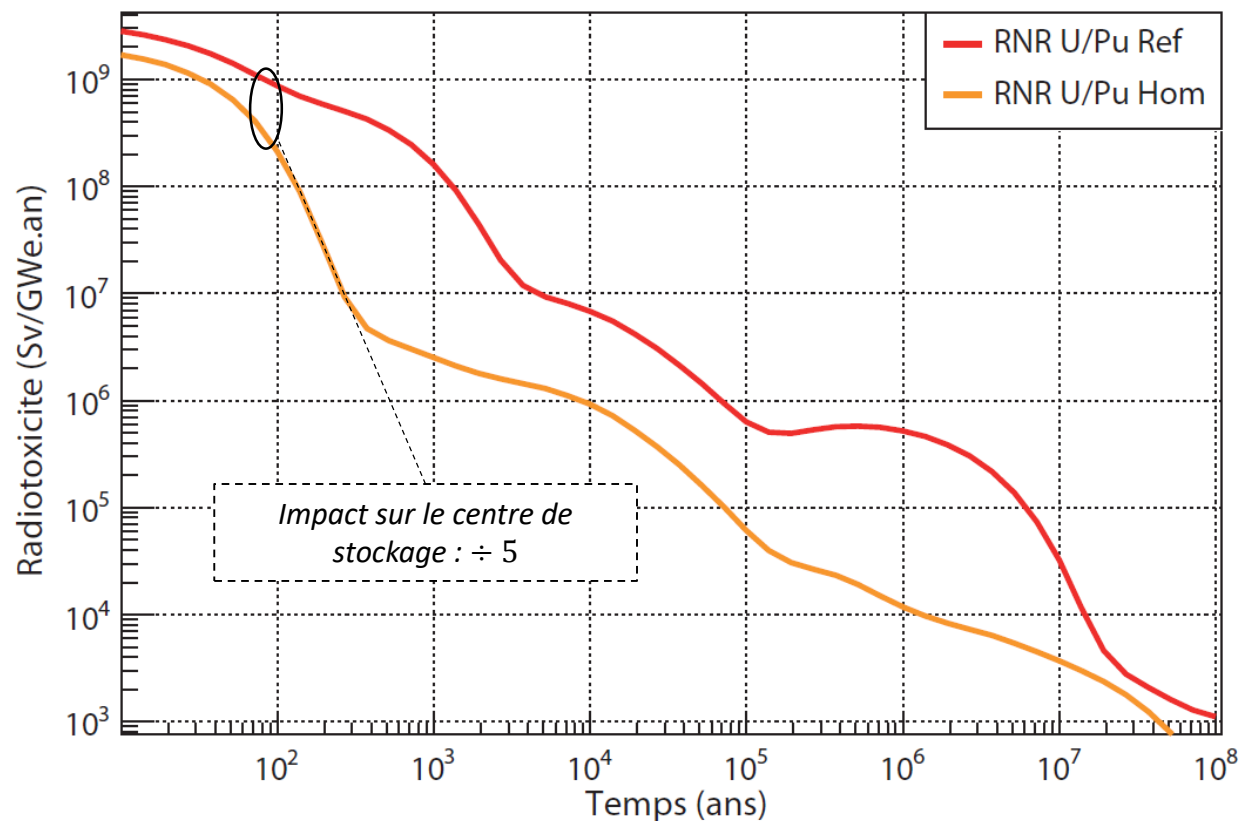
➤ En RNR



➤ Stratégie double strate



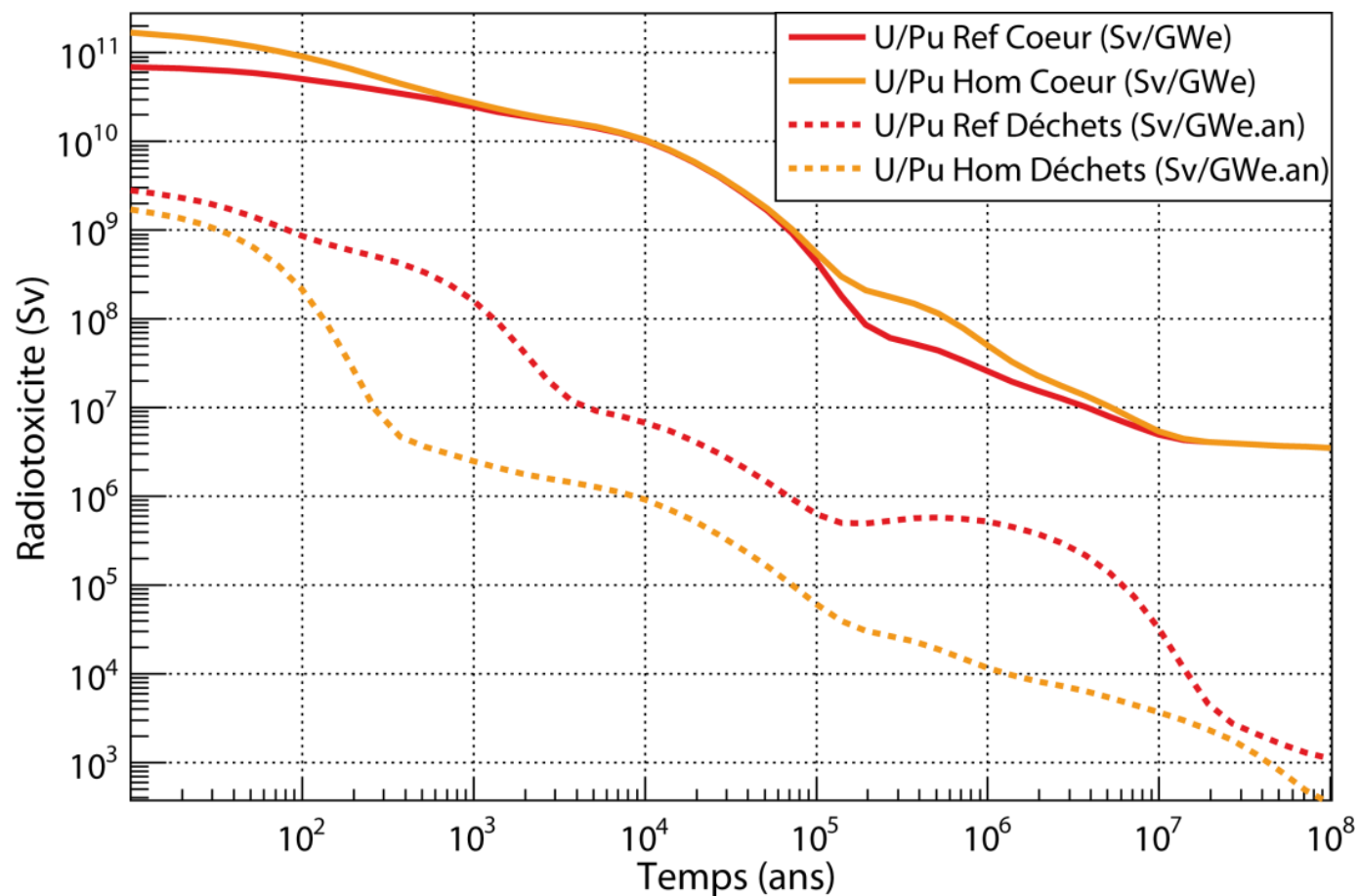
Déchets ↔ PF + pertes chimiques au retraitement (~0,1%)



- Pour avoir un gain réel sur le stockage, il faut entreposer plus longtemps.
- On gagne un facteur 5 sur l'emprise du stockage si on entrepose 50 ans supplémentaire

## IV/ Les enjeux pour le parc à l'horizon 2090

Quand on stock les déchets dans les combustibles, on ne produit plus de déchets !



*Dans un réacteur à spectre rapide, l'inventaire en plutonium est conséquent*

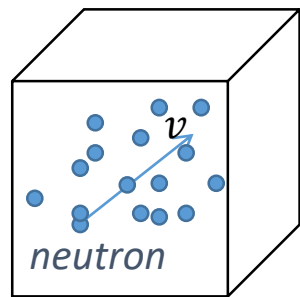
- Il faut 1000 ans de fonctionnement pour produire une radiotoxicité équivalente à celle qui est contenu dans le cœur
- Les stratégies de « fin de jeu » peuvent conditionner les choix technologiques futurs !

## ➤ Quelques messages à retenir :

- La **temporalité** de la transition **énergétique**, couplée à celle du nucléaire, impose les réflexions avec les **technologies actuelles** :
  - Piscine pour les combustibles usés : >16 ans
  - EPR de Flamanville (FA3) : >16 ans (de construction)
  - EPR2 (calendrier actuel) : >13 ans (entre la décision et la construction)
  
- Le **renouvellement** du parc, ainsi que **l'extension** de la durée de **vie du parc actuel**, est **nécessaire**
  - Associé à un besoin de « flexibilité » (suivi de charge)
  
- La question du **statut du plutonium est centrale**
  - **Ressource** précieuse pour les **réacteurs à neutrons rapides...** qui seront peut être déployé **après 2080**
  - Le Pu concentre la majeure partie de la **radiotoxicité de l'inventaire**
  
- La **temporalité de l'électronucléaire** complique la **gestion** du plutonium
  - Les conclusions du débat publique associé au 5<sup>ème</sup> **PNGMDR** ne sont pas compatibles avec cette temporalité  
*Remise en question du statut des MOX usés si pas d'utilisation planifié avec le parc actuel (et de l'Uapp et URT)*
  
- **Utilisation du plutonium et de l'uranium de retraitement dans les scénarios actuels**
  - Enjeux de R&D sur les réacteurs et sur le combustible
  - Temporalité associée au renouvellement des installations du cycle (notamment MELOX)



- La section efficace permet de lier le comportement d'un neutron aux taux de réactions



Matière :  $N, \sigma$

Probabilité d'interaction selon  $dx$  :  $\frac{1}{\lambda} dx = N \cdot \sigma \cdot dx = N \cdot \sigma \cdot v \cdot dt$

Pour  $n$  neutrons par  $cm^3$ , le nombre d'interaction pendant  $dt$  est alors :  $n \cdot N \cdot \sigma \cdot v$

$\phi = n \cdot v$  : Flux neutronique  $\longrightarrow$  Taux de réaction :  $\tau = N \cdot \sigma \cdot \phi$

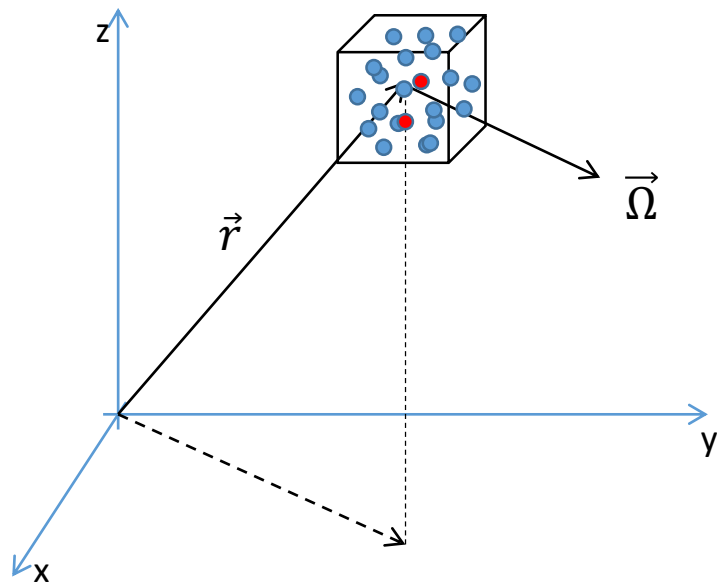
- Le flux neutronique est une grandeur volumique !!  
 →  $\phi$  n'est pas un courant (qui lui, serait associé à une surface et à une direction)
- Maintenant on peut quantifier la réaction en chaîne : Le coefficient de multiplication effectif des neutrons  
 → nombre de neutrons produit *par fission* pour chaque neutron du système

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Production des neutrons par fission}}{\text{Disparition des neutrons}}$$

- De multiple objectifs :
  - Quantifier la criticité du système
  - Calculer les dépôts de chaleurs locaux
  - Estimer les évolutions des matières (activation des structures, épuisement du combustible,...)

→ Taux de réaction (fonction de l'espace et du temps) :  $\tau = N \cdot \sigma \cdot \phi$

$$\phi = n \cdot v$$



- $n$  = nombre de neutrons par unité de volume à l'endroit considéré, à l'énergie considérée et se déplaçant selon l'angle considéré !
- 7 variables
  - 3 pour la position
  - 2 pour direction
  - 1 pour l'énergie
  - 1 pour le temps

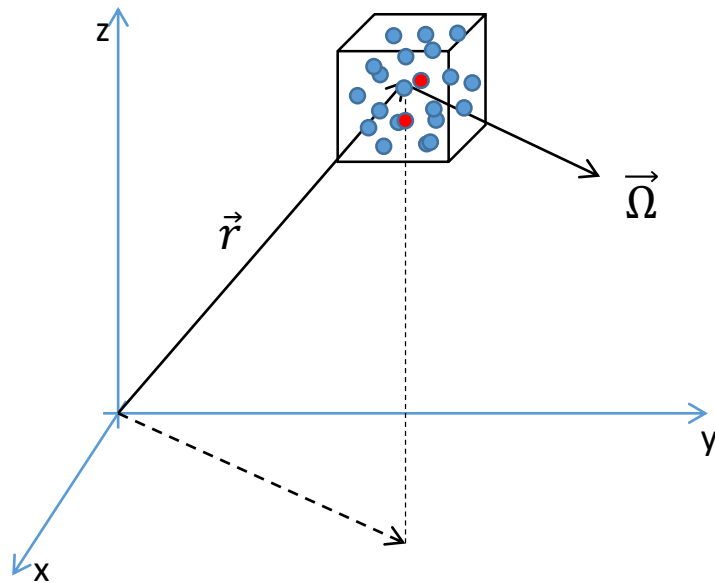
- Pour construire l'équation qui régit le comportement des neutrons, on fait un bilan

$$\frac{dn}{dt} = \frac{in - out}{dt} + \frac{production - disparition}{dt}$$

- Disparition = totalité des réactions entre les neutrons et le milieu  
*Chaque collision fait disparaître le neutron de son état  $(E, \vec{r}, \vec{\Omega})$*

*disparition par réaction*

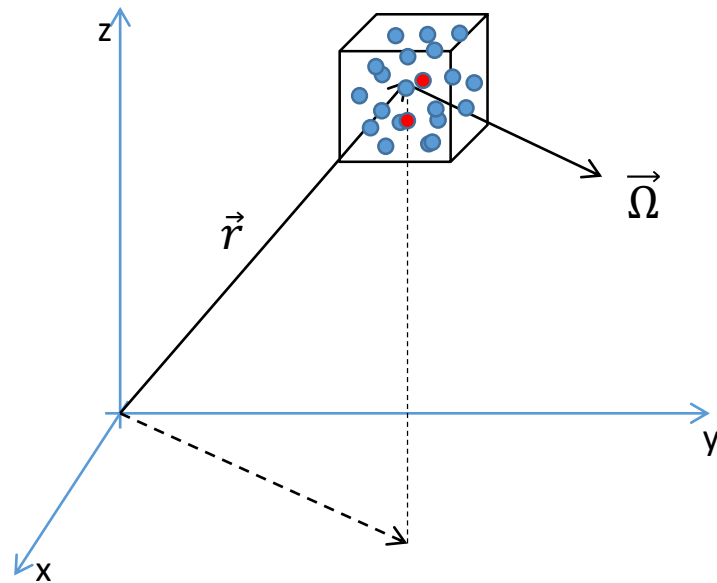
$$= \iiint_{\text{volume}} \Sigma_{abs+diffusion}(\vec{r}, E) \cdot \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, t, E) \cdot d^2\vec{\Omega} dE d^3\vec{r}$$





- Pour construire l'équation qui régit le comportement des neutrons, on fait un bilan

$$\frac{dn}{dt} = \frac{in - out}{dt} + \frac{production - disparition}{dt}$$



- Disparition = totalité des réactions entre les neutrons et le milieu  
*Chaque collision fait disparaître le neutron de son état  $(E, \vec{r}, \vec{\Omega})$*

*disparition par réaction*

$$= \iiint_{\text{volume}} \Sigma_{abs+diffusion}(\vec{r}, E) \cdot \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, t, E) \cdot d^2\vec{\Omega} dE d^3\vec{r}$$

- Production par collision = les collisions d'énergie  $E'$  ou  $\vec{\Omega}'$  qui laisse le neutrons à l'énergie  $E$  ou  $\vec{\Omega}$

*production par collision =*

$$\iiint_{\text{volume}} d^3\vec{r} \iint_{4\pi} d^2\vec{\Omega}' \int_{E'=0}^{E'=\infty} \Sigma_{diffusion}(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E) \phi(\vec{r}', \vec{\Omega}', t, E') dE'$$

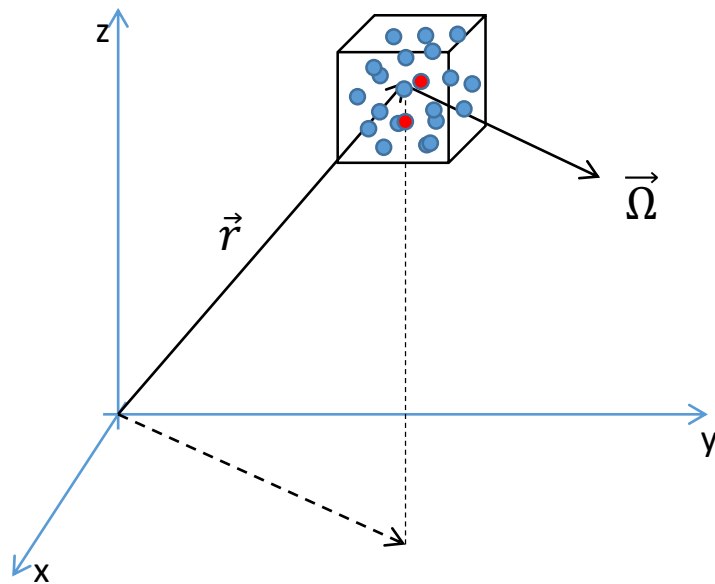
- Pour construire l'équation qui régit le comportement des neutrons, on fait un bilan

$$\frac{dn}{dt} = \frac{in - out}{dt} + \frac{production - disparition}{dt}$$

- Production par fission = nombre de fission multiplié par la probabilité que les neutrons ait la « bonne énergie »  $E$  et la « bonne direction »  $\vec{\Omega}$

*production par fission =*

$$\iiint_{\text{volume}} d^3\vec{r} \iint_{4\pi} d^2\vec{\Omega}' \int_{E'=0}^{E'=\infty} \Sigma_{fission}(\vec{r}, E') \phi(\vec{r}', \vec{\Omega}', t, E) \chi(E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) dE'$$



- Pour construire l'équation qui régit le comportement des neutrons, on fait un bilan

$$\frac{dn}{dt} = \frac{in - out}{dt} + \frac{production - disparition}{dt}$$

- Production par fission = nombre de fission multiplié par la probabilité que les neutrons ait la « bonne énergie »  $E$  et la « bonne direction »  $\vec{\Omega}$

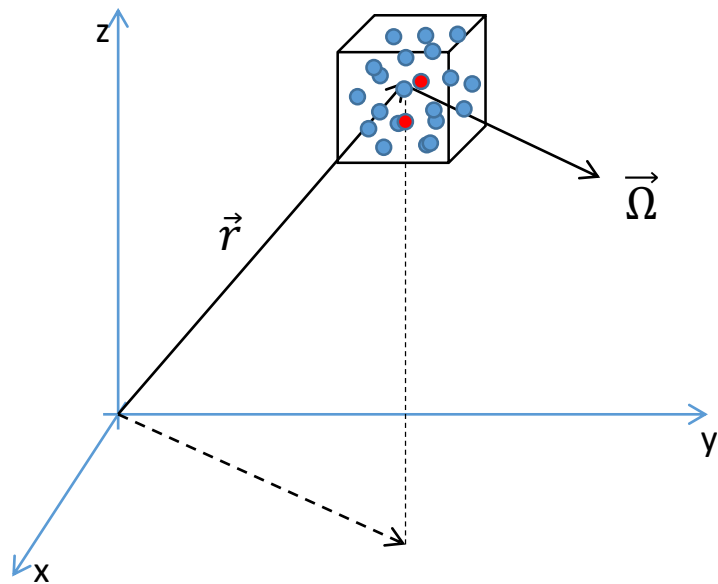
*production par fission =*

$$\iiint_{volume} d^3\vec{r} \iint_{4\pi} d^2\vec{\Omega}' \int_{E'=0}^{E'=\infty} \Sigma_{fission}(\vec{r}, E') v. n(\vec{r}', \vec{\Omega}', t, E) \chi(E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) dE'$$

- Déplacement = nombre de neutrons de la « bonne énergie » et de la « bonne direction » qui sortent du volume considéré (*pour aller à côté*)

*In - out =*

$$\iint_{surface} \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) \vec{\Omega} \cdot d^2\vec{S} = \iiint_{volume} div(\vec{J}) \cdot d^3\vec{r} = \iiint_{volume} div(\phi \cdot \vec{\Omega}) \cdot d^3\vec{r}$$



- Pour construire l'équation qui régit le comportement des neutrons, on fait un bilan

$$\frac{dn}{dt} = \frac{in - out}{dt} + \frac{production - disparition}{dt}$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{v} \frac{d\phi}{dt} = \underbrace{-div(\phi \cdot \vec{\Omega})}_{\text{Transport}} - \Sigma_{total} \phi + \underbrace{\int_{E', \vec{\Omega}'} \Sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E) \phi d^2\vec{\Omega} dE'}_{\text{Ralentissement}} + \underbrace{\int_{E', \vec{\Omega}'} \bar{v} \frac{1}{4\pi} \chi(E) \cdot \Sigma_f \phi \cdot d^2\vec{\Omega} dE'}_{\text{Production par fission}} + \underbrace{S}_{\text{Sources externes de neutrons (neutrons issus de décroissance)}}$$

- Si on est critique, la production des neutrons compense exactement la disparition (sans source externe) !

$$\rightarrow \frac{dn}{dt} = 0 !$$

- Sinon, la population des neutrons évolue à la hausse ou à la baisse suivant la valeur de  $k_{eff}$
- Pour estimer  $k_{eff}$ , on résout l'équation « indépendante du temps »

$$0 = -div(\phi \cdot \vec{\Omega}) - \Sigma_{total} \phi + \int_{E', \vec{\Omega}'} \Sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E) \phi d^2\vec{\Omega} dE' + \int_{E', \vec{\Omega}'} \frac{\bar{v}}{k_{eff}} \frac{1}{4\pi} \chi(E) \cdot \Sigma_f \phi \cdot d^2\vec{\Omega} dE'$$

$$0 = -\text{div}(\phi \cdot \vec{\Omega}) - \Sigma_{total}\phi + \int_{E', \vec{\Omega}'} \Sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E)\phi d^2\vec{\Omega}' dE' + \int_{E', \vec{\Omega}'} \frac{\bar{v}}{k_{eff}} \frac{1}{4\pi} \chi(E) \cdot \Sigma_f \phi \cdot d^2\vec{\Omega}' dE'$$

➤ Tentative de résolution directe (discrétisation de l'espace des phases) → méthode déterministe

Quelques ordres de grandeurs

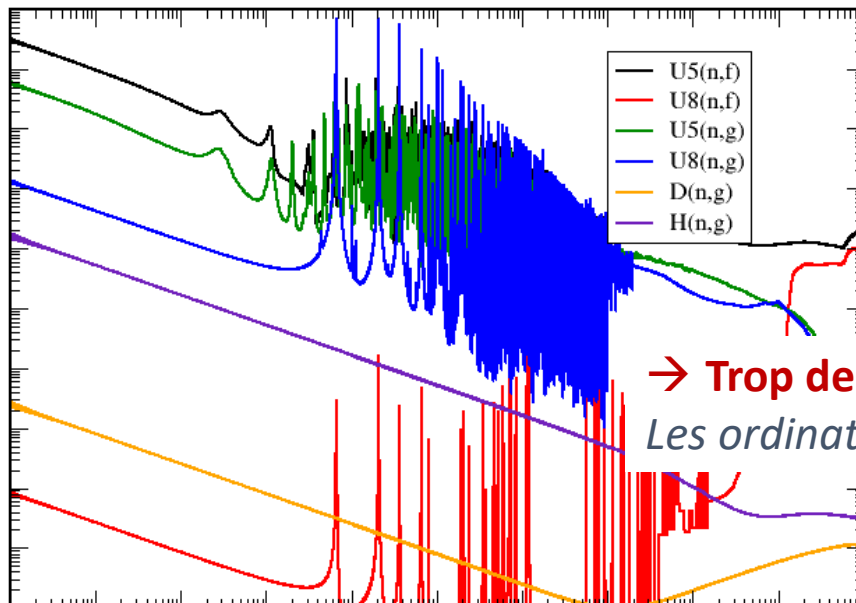
- Domaine énergétique des neutrons : from 25 meV to 20 MeV

> 20 000 bins

- Libre parcours moyen du neutron : ~cm

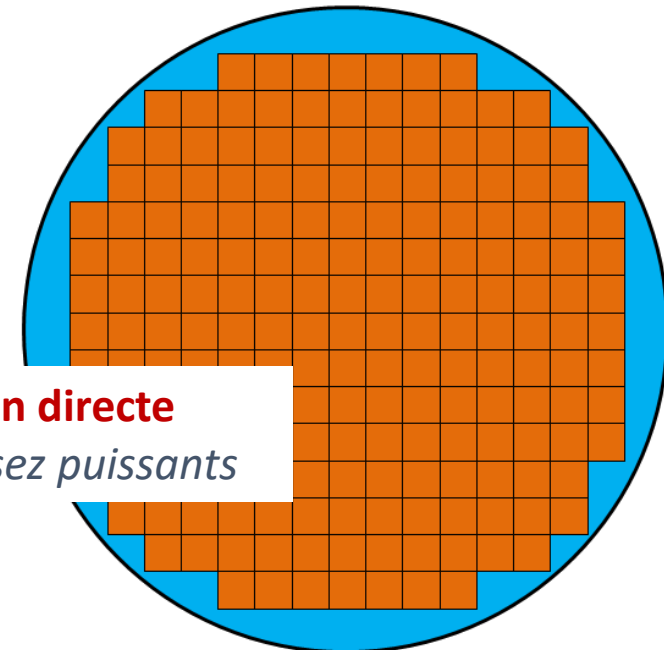
( fuel pin : ~1 cm ; assemblage : ~20 cm, cœur ~4m)

>10<sup>9</sup> bins (10<sup>3</sup> dans chaque directions)



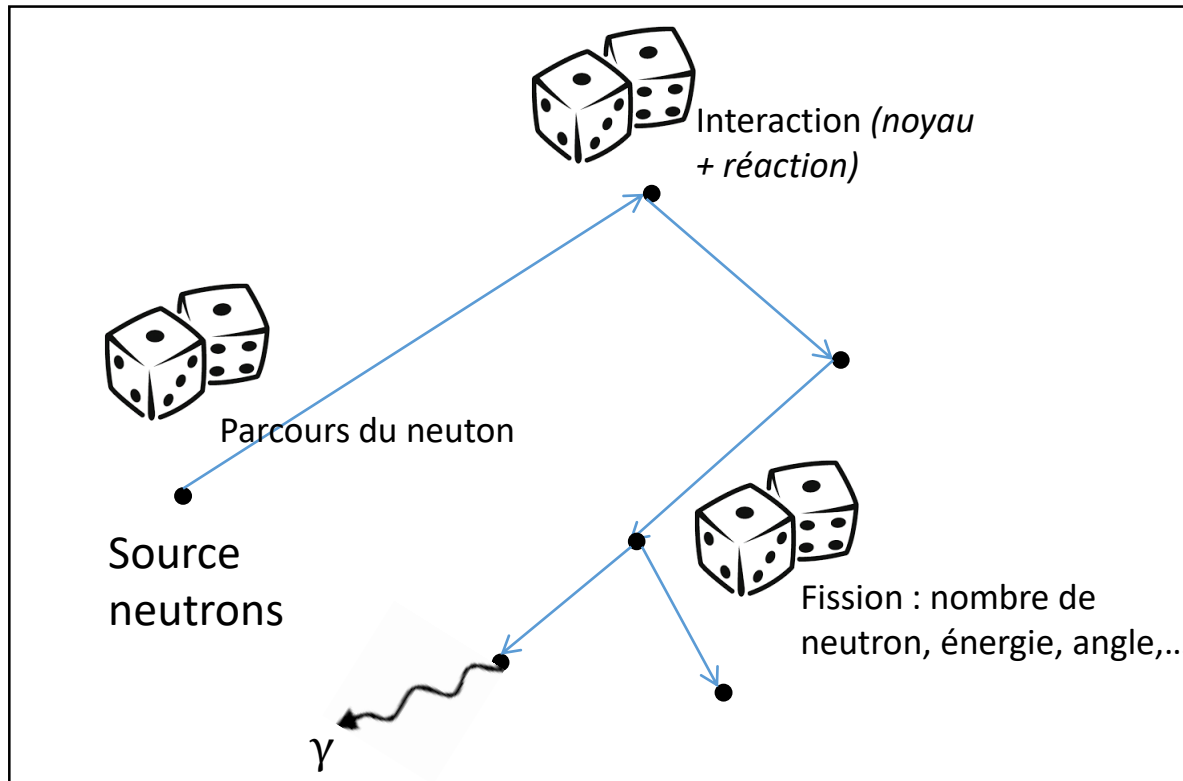
→ Trop de mailles pour une résolution directe

Les ordinateurs ne sont pas encore assez puissants



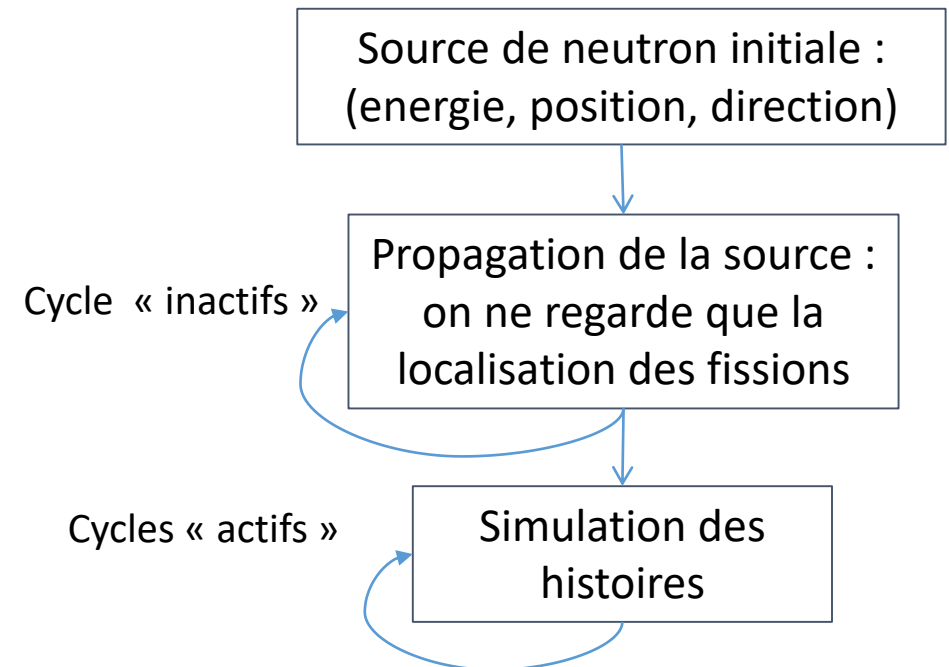
$$0 = -\text{div}(\phi \cdot \vec{\Omega}) - \Sigma_{total} \phi + \int_{E', \vec{\Omega}'} \Sigma_s(\vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E) \phi d^2\vec{\Omega}' dE' + \int_{E', \vec{\Omega}'} \frac{\bar{v}}{k_{eff}} \frac{1}{4\pi} \chi(E) \cdot \Sigma_f \phi \cdot d^2\vec{\Omega}' dE'$$

- Approche stochastique : simulation des histoires d'un **grand** nombre de particules (pas de discrétisation)



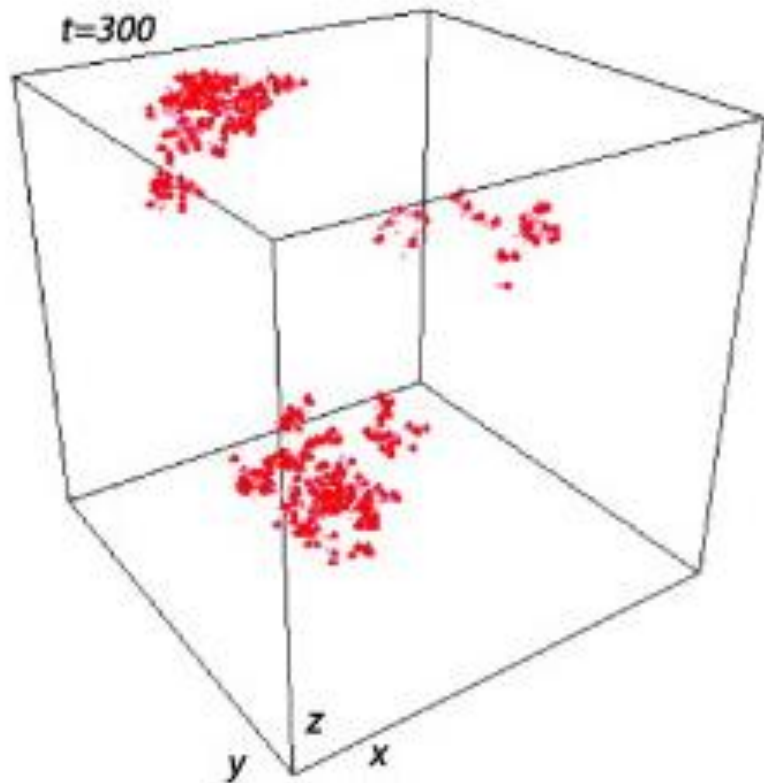
Dans un système critique, quand arrêter les histoires ?

→ à la fission



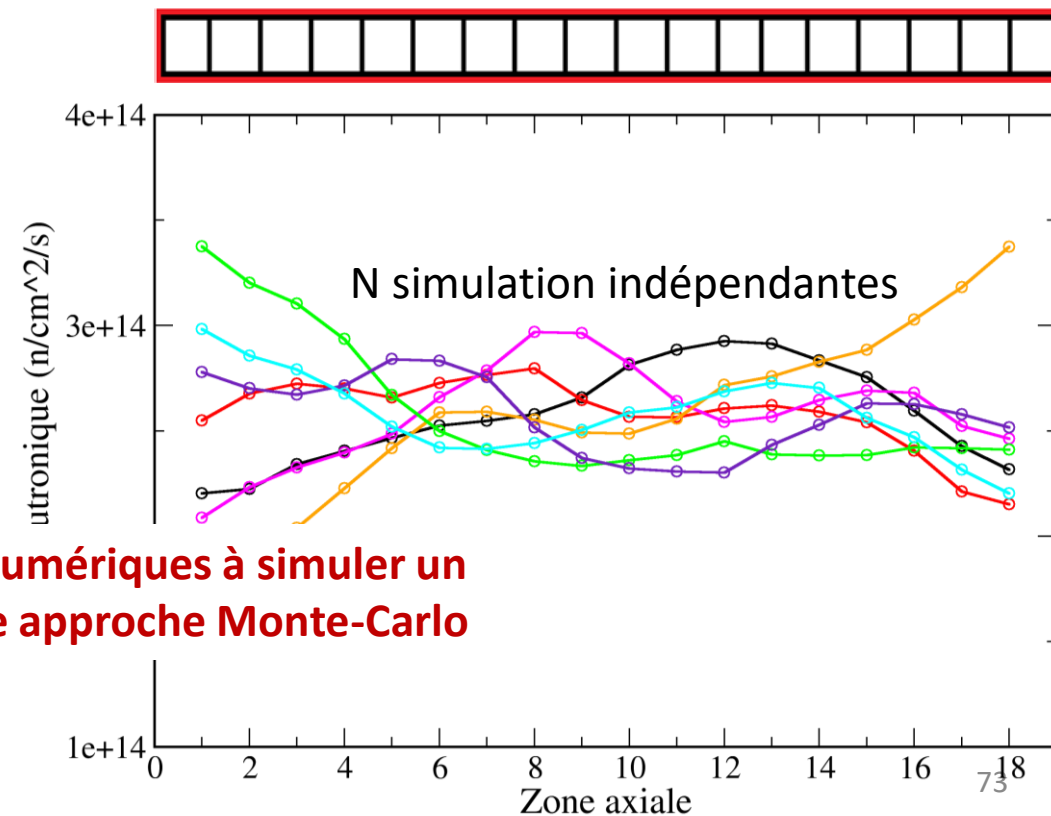
Histoires ne sont donc pas complètement indépendantes

➤ Approche stochastique : simulation des histoires d'un **grand** nombre de particules (pas de discrétisation)

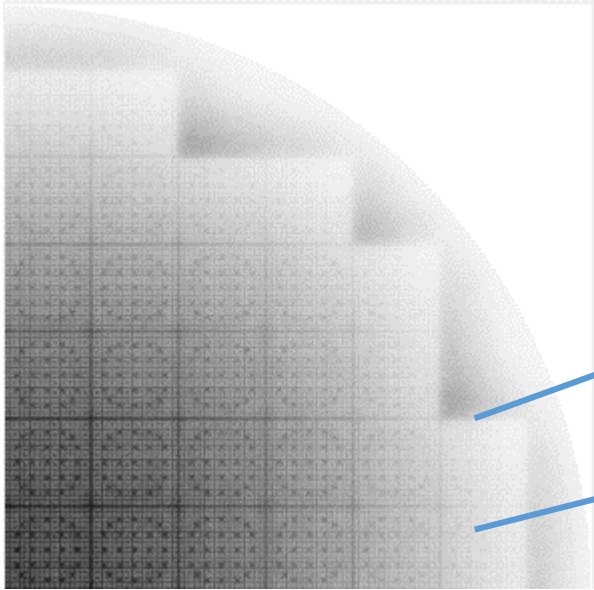


→ Dans les géométries où le libre parcours moyen des neutrons est faible devant la grandeur caractéristique du cœur, on observe un phénomène de « **clustering** »

→ Dans un REP :  $\lambda \sim 3\text{cm}$  et  $h = 4\text{m}$  !

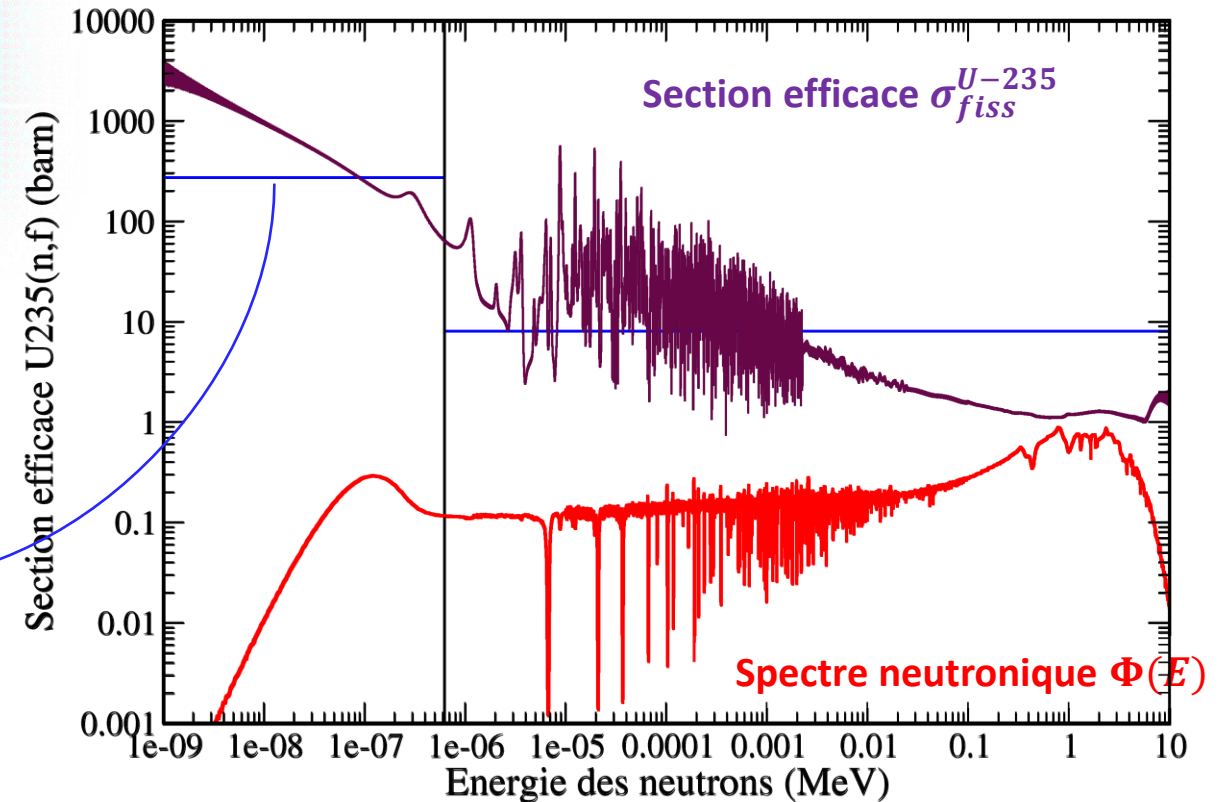


→ **Grosses difficultés numériques à simuler un cœur de REP via une approche Monte-Carlo**

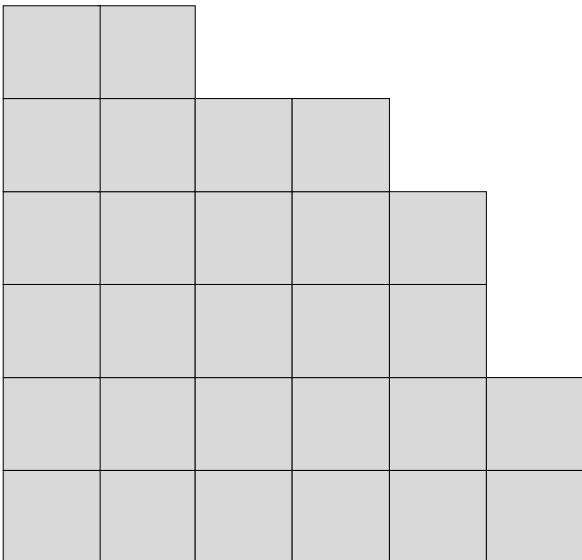


➤ Etape 1 : Résolution fine de l'équation du transport sur des géométries limités en conditions infinies :

→ Calcul du spectre neutronique (caractéristique des neutrons) à partir des sections efficaces



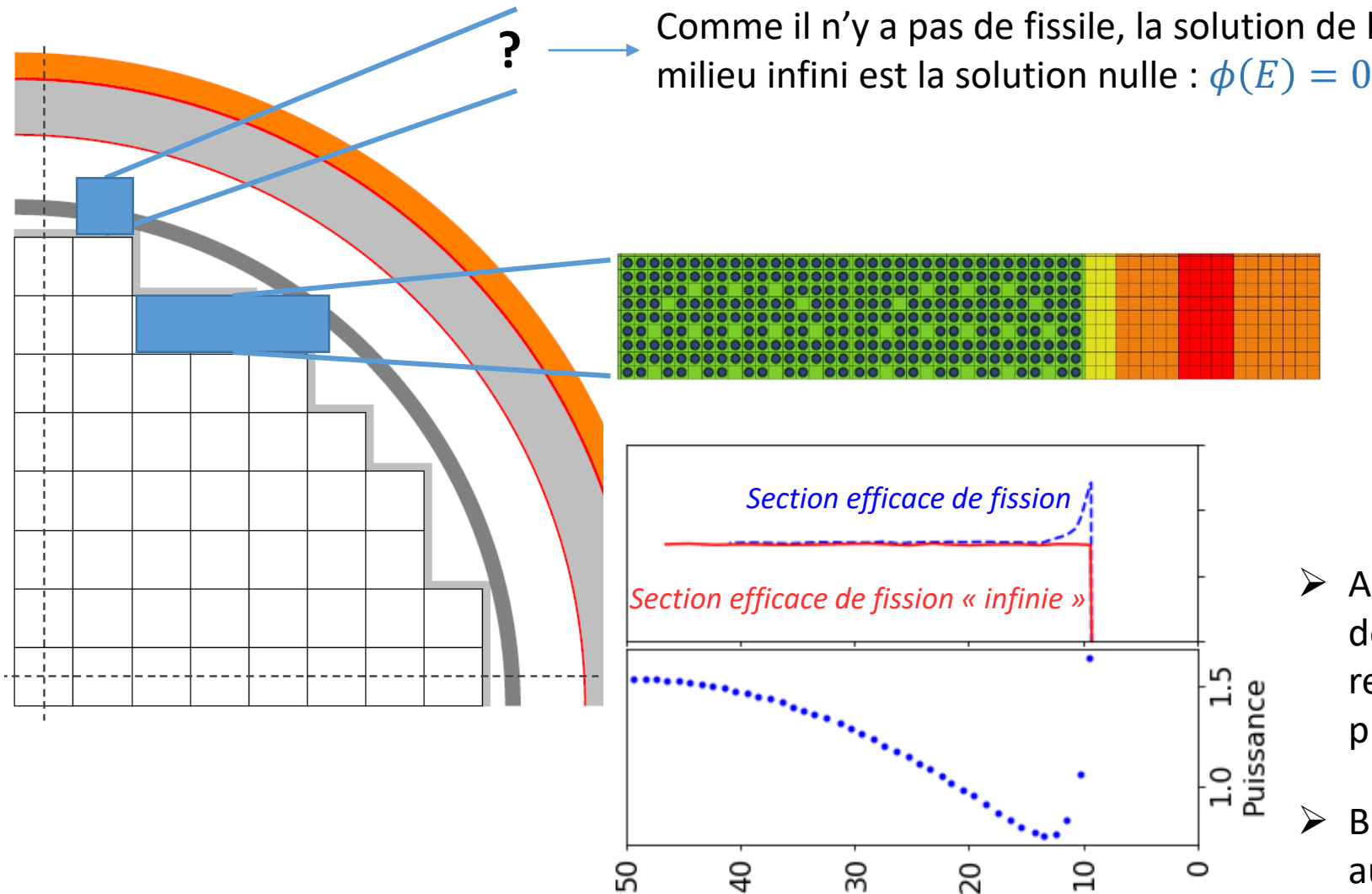
$$\Sigma = N \cdot \frac{\int_0^{E_c} \sigma(E) \phi(E) dE}{\int_0^{E_c} \phi(E) dE}$$



➤ Etape 2 : Résolution de l'équation de la diffusion (sans angles et 2 énergies)



### ➤ Les interfaces !



Simulation d'une traverse pour calculer le comportement moyen des neutrons

➔ Dépend du type de combustible « qui alimentent la simulation »

➤ A l'interface, pour le combustible, les données « infinies » sont utilisés, ne représentant pas correctement la réalité physique

➤ Biais dans les calculs sur l'estimation du flux aux interfaces

➔ *Solution « produit » parfois hasardeuse*

- **De gros efforts pour modéliser précisément le comportement des neutrons dans un système critique**
  - *Pour les réacteurs de puissances actuelles, la taille du réacteur et le libre parcours moyen des neutrons imposent une approche multi-échelle*
  - *Cette approche repose sur l'hypothèse que le comportement des neutrons dans l'assemblage est dicté par l'assemblage en lui-même*
  - *Hypothèse en défaut dans des systèmes différents (à neutrons rapides et encore plus quand le combustible est liquide)*