

# Energie nucléaire du futur : Quelles questions? Quelle recherche?

Marc Ernoult

IJCLab, CNRS-IN2P3 / Université Paris-Saclay

# Energie nucléaire du futur : Quelles questions? Quelle recherche?

Partie 1/2

Marc Ernoult

IJCLab, CNRS-IN2P3 / Université Paris-Saclay



# 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

2015 : Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte : Descendre à 50% de nucléaire



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



2021  
5 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 %

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



## France Relance : soutien renforcé à l'industrie nucléaire

16/04/2021

Barbara Pompili, Bruno Le Maire, et Agnès Pannier-Runacher ont signé l'avenant au contrat stratégique de filière nucléaire et annoncé les lauréats de la première relève de l'appel à projets de soutien à l'investissement et à la modernisation de l'industrie nucléaire.

## Lancement construction EPR 2

- **Penly 3 et 4**
    - Débat public : 27 octobre 2022 au 27 février 2023
    - demande d'autorisation de création : 29 juin 2023
    - Travaux préparatoire du site : début été 2024
    - Estimé à 17 milliards d'€ les 2
    - vise une entrée en service en 2035-2036 (+11-12 ans)
  - **Gravelines 7 et 8**
    - Débat public : 17 septembre 2024 au 17 janvier 2025
    - 17 septembre 2024 au 17 janvier 2025
    - Estimé à 17 milliards d'€ les 2
    - mise en service à l'horizon 2038 (+13 ans)
  - **Bugey 6 et 7**
    - Débat public : en cours d'organisation depuis le 5 juin 2024
    - Estimé à 15 milliards d'€ les 2
    - mise en service à l'horizon 2042 (+16 ans)
  - **Construction envisagée de 8 EPR2 supplémentaires**
    - sur les sites de centrales existantes
- 6 réacteur d'ici 2040, 8 de plus entre 2040 et 2050  
➤ Environ 1 réacteur par an



JIMMY  
NEWCLEO  
CALOGENA  
BLUE CAPSULE  
HEXANA  
ORTRERA  
NAAREA  
STELLARIA  
THORIZON  
REN. FUSION  
GENF





### Electricité nucléaire ~ 0 gCO<sub>2</sub>/TWh en fonctionnement

#### Scenario énergétique GIEC :

« la part de l'énergie nucléaire et des combustibles fossiles avec captage et stockage du CO<sub>2</sub> (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**



# Intro : Recherche sur l'Énergie nucléaire

1932 : Découverte du neutron

1938 : Phénomène de la fission induite par neutron

1939 : Preuve théorique d'une réaction en chaîne

1941 : Premier réacteur nucléaire (0W) : Pile de Fermi

1945 : Fondation du CEA «organisme de recherche consacré à l'énergie atomique»

1951 : Première centrale nucléaire (200 kW elec) : EBR-1 (USA)

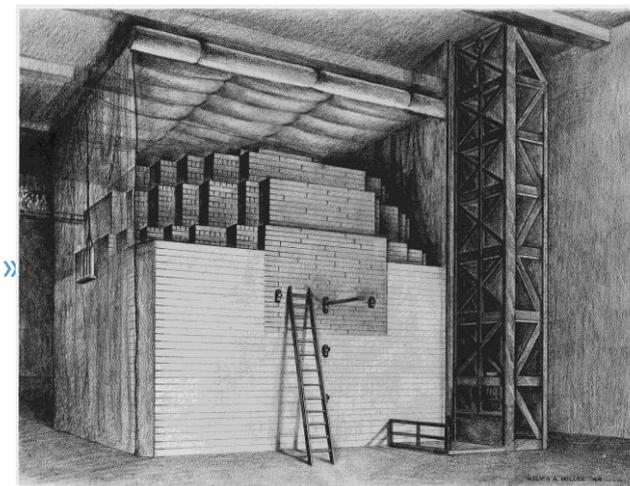
1966-1971 : Construction UNGG (~2GWe cumul)

1973 : 1er choc pétrolier

1974 – 1980 : Engagement de l'équivalent de 55 réacteurs (~60GWe cumul)

1991 : loi Bataille relatif à la gestion des déchets radioactifs

- La question du nucléaire entre en démocratie
- Définit le rôle des grands acteurs (ASN et IRSN, ANDRA, CEA, CNRS)
- L'IN2P3 est mobilisé depuis ~1995 (dont C. Rubia, H. Flocard et H. Doubre)
  - Recherches contraintes par la loi
  - Acteur de l'enseignement
  - Expertise académique



1979

1986

2011



2006 (puis 2012) : Programme relatif à la gestion durable des matières

Arrêté du 29 avril 2016 :

**IN2P3 assure une mission nationale d'animation et de coordination des recherches sur l'énergie nucléaire**



# Plan du cours

- **Introduction**

- 1. Physique nucléaire et physique des réacteurs**

1. Fission, réaction en chaîne et criticité
2. Interaction neutron matière
3. Réacteur à eau pressurisés
4. Modélisation des réacteurs
5. Importance des données nucléaires

- 2. Les déchets nucléaires**

1. Qu'est ce qu'un déchet nucléaire ?
2. Solutions de gestion des déchet
3. Intérêt de la stratégie française

- 3. Recyclage et ressources en uranium naturel**

1. Valorisation du plutonium
2. Pourquoi la 4<sup>e</sup> génération?

- 4. La transmutation**

1. Principe et objectifs
2. Possibilités techniques
3. Relation avec le stockage

- **Conclusions**

- Quelques ordres de grandeurs
- Réfléchir globalement : rôle des scénarios



### **Remarque :**

**Cours centré sur la neutronique et la physique des noyaux dans le cycle électronucléaire**

**A l'in2p3, il y a aussi :**

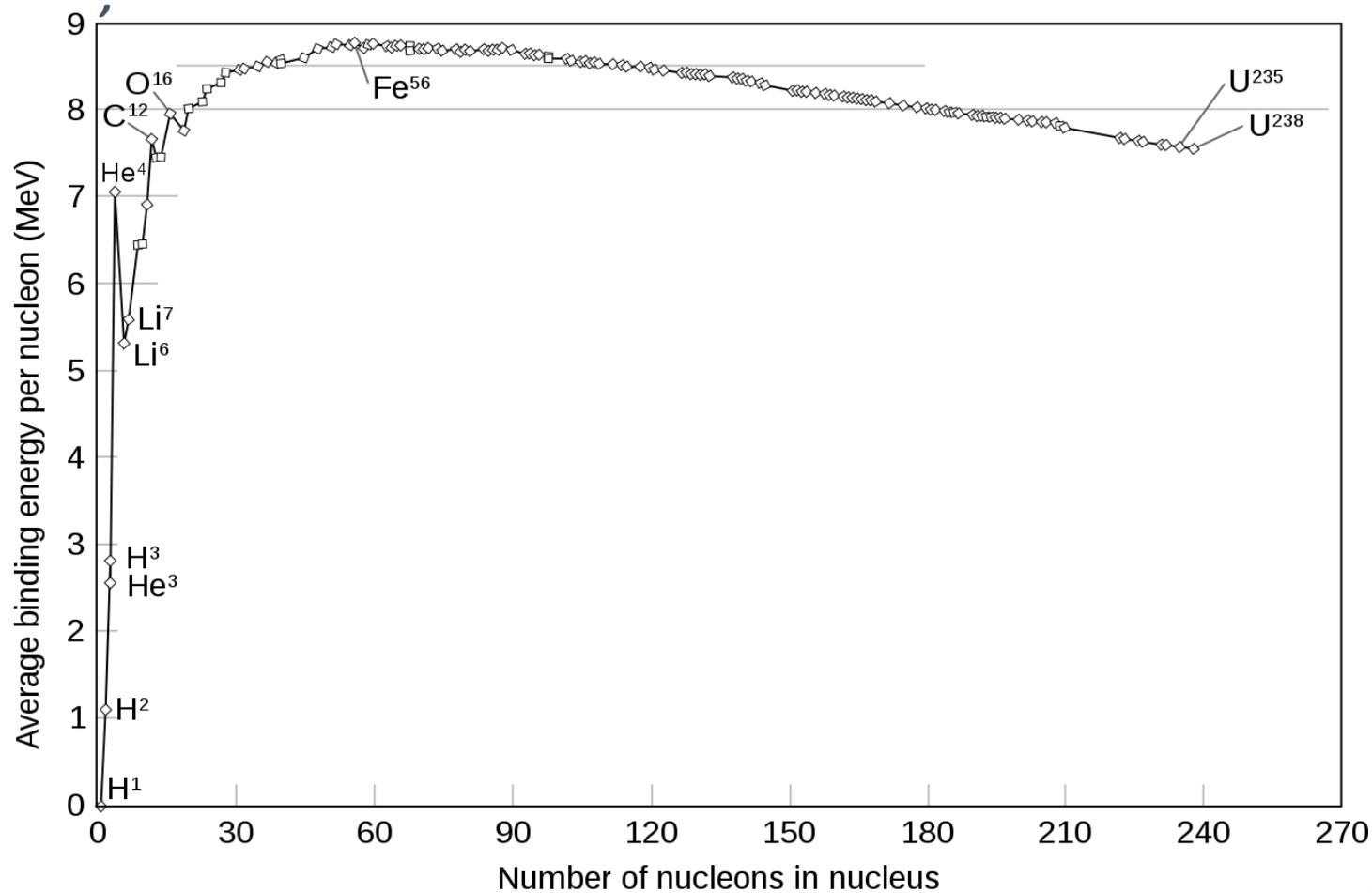
- **Matériaux pour les réacteurs**
- **Chimie du cycle électronucléaire**
- **Matériaux pour le stockage des déchets**
- **Chimie des radio-isotopes dans l'environnement**

**En collaboration proche avec des équipes INC, INEE**



# 1.1 Fission, réaction en chaîne et criticité

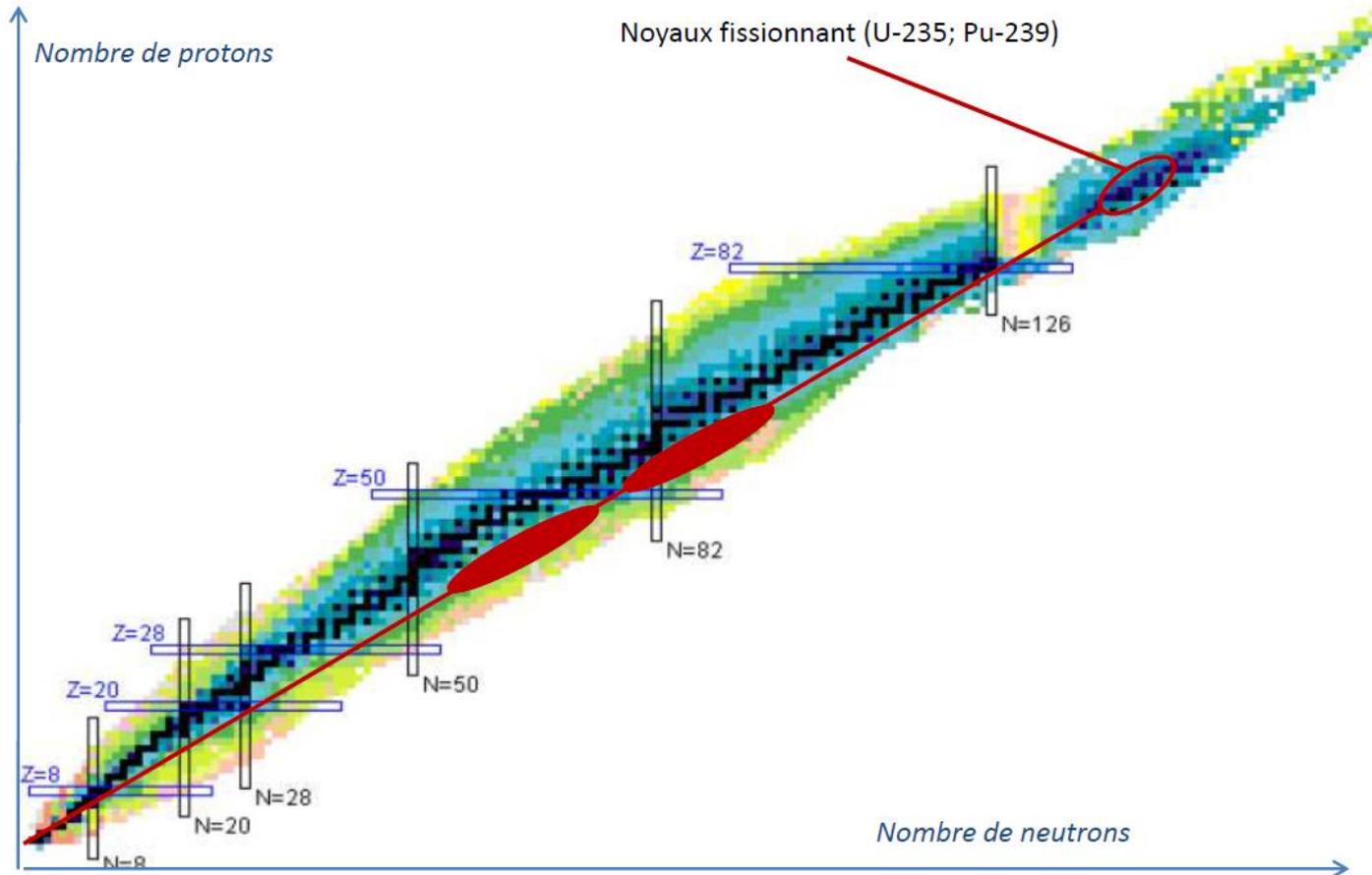
*La fission des noyaux lourds libère une grande quantité d'énergie (200 MeV)*





# 1.1 Fission, réaction en chaîne et criticité

*La fission des noyaux lourds libère une grande quantité d'énergie (200 MeV) produit deux **fragments de fission** et entre **2 et 3 neutrons***

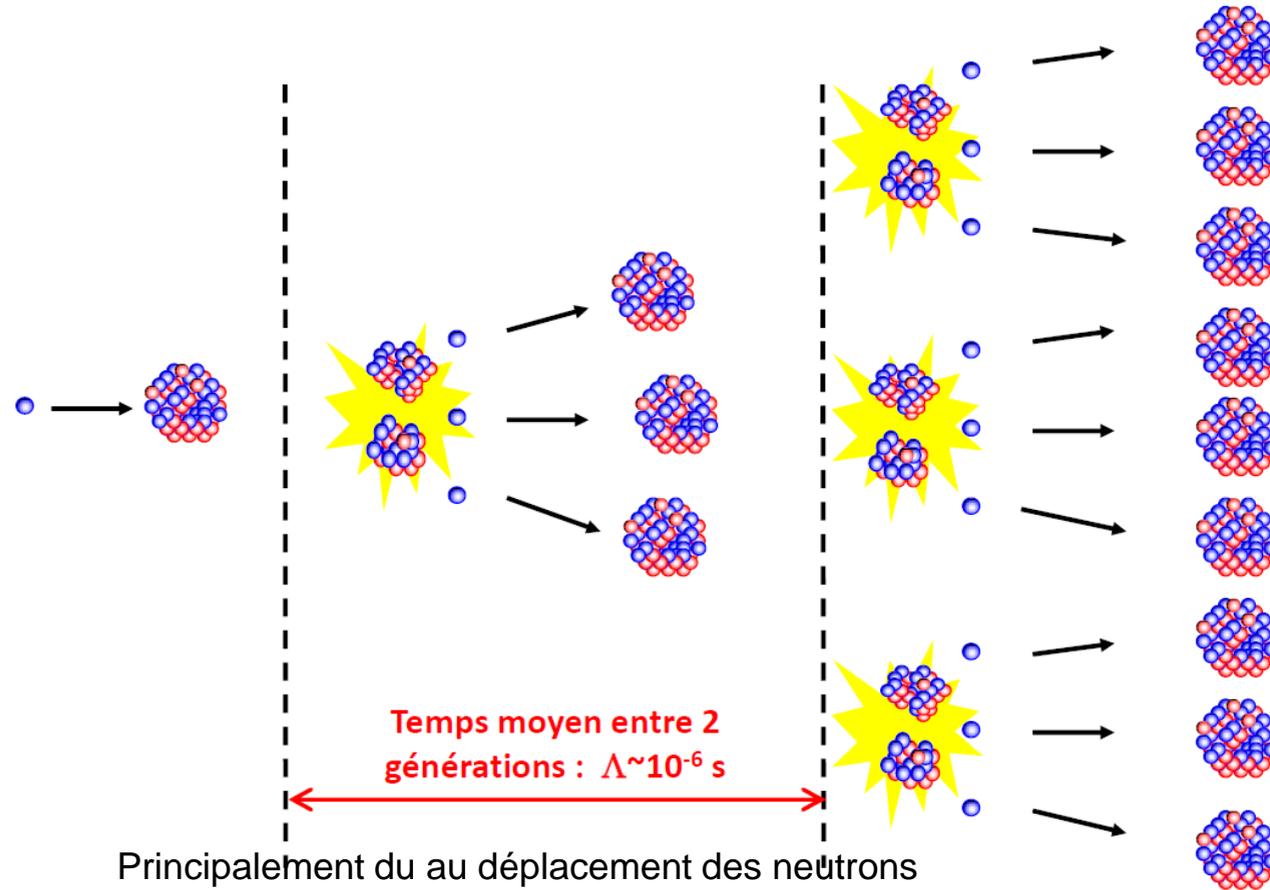




# 1.1 Fission, réaction en chaîne et criticité

1W =>  $3 \cdot 10^{10}$  fissions par seconde

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



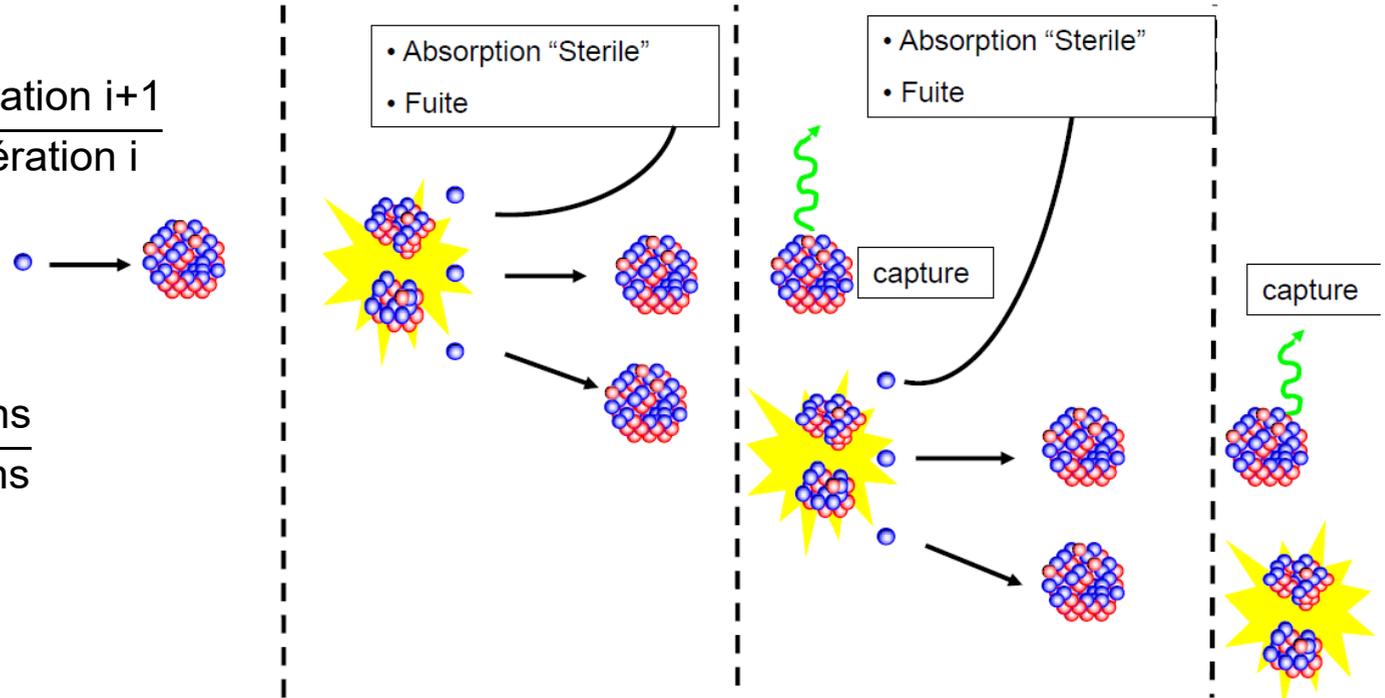


# 1.1 Fission, réaction en chaîne et criticité

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

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

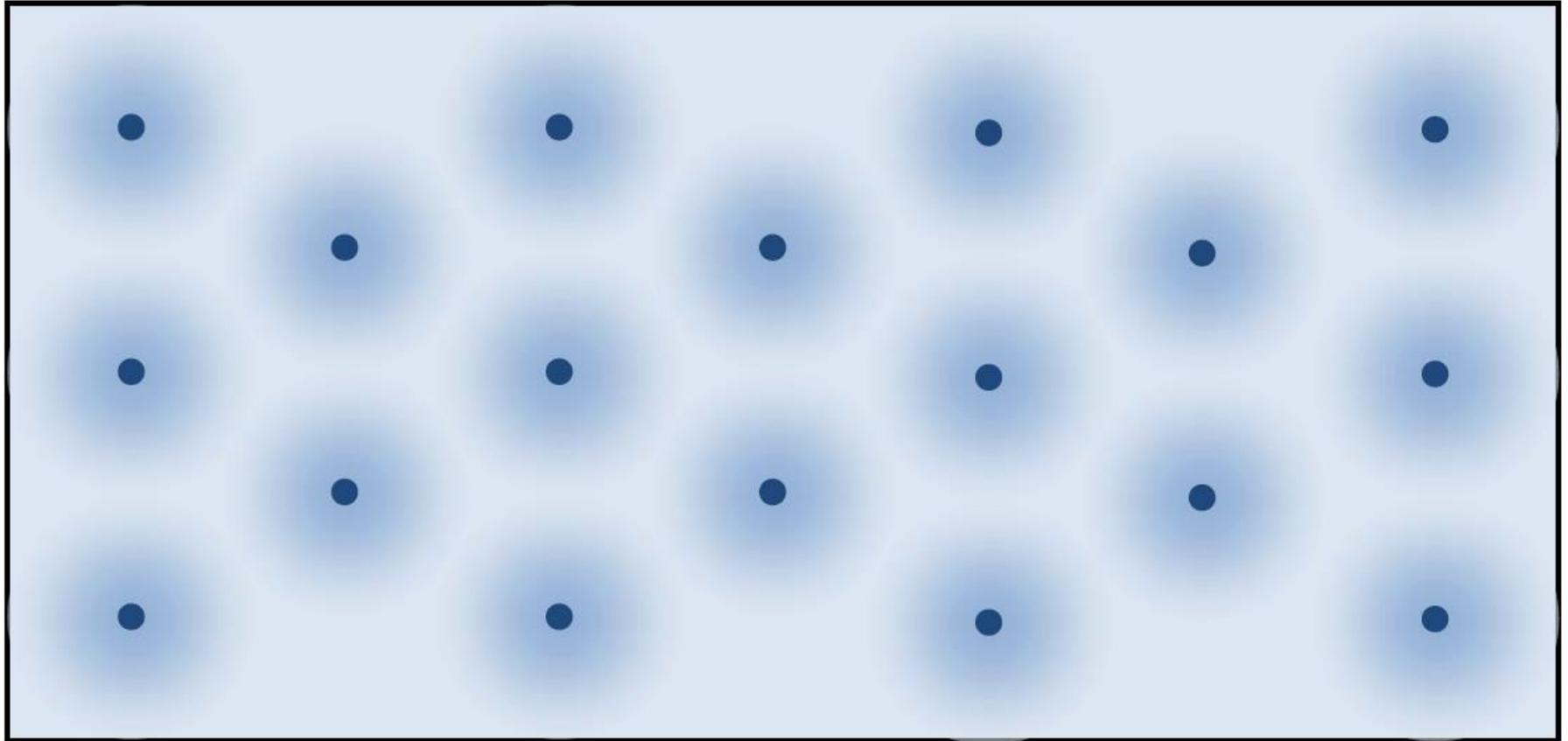
$$k_{eff} = \frac{\text{Production de neutrons}}{\text{Disparition de neutrons}}$$



**$k=1 \rightarrow$  Nombre de fission par seconde (= puissance) constant  $\rightarrow$  Réaction stable  
 $\Rightarrow$  réacteur en fonctionnement normal = état d'équilibre**



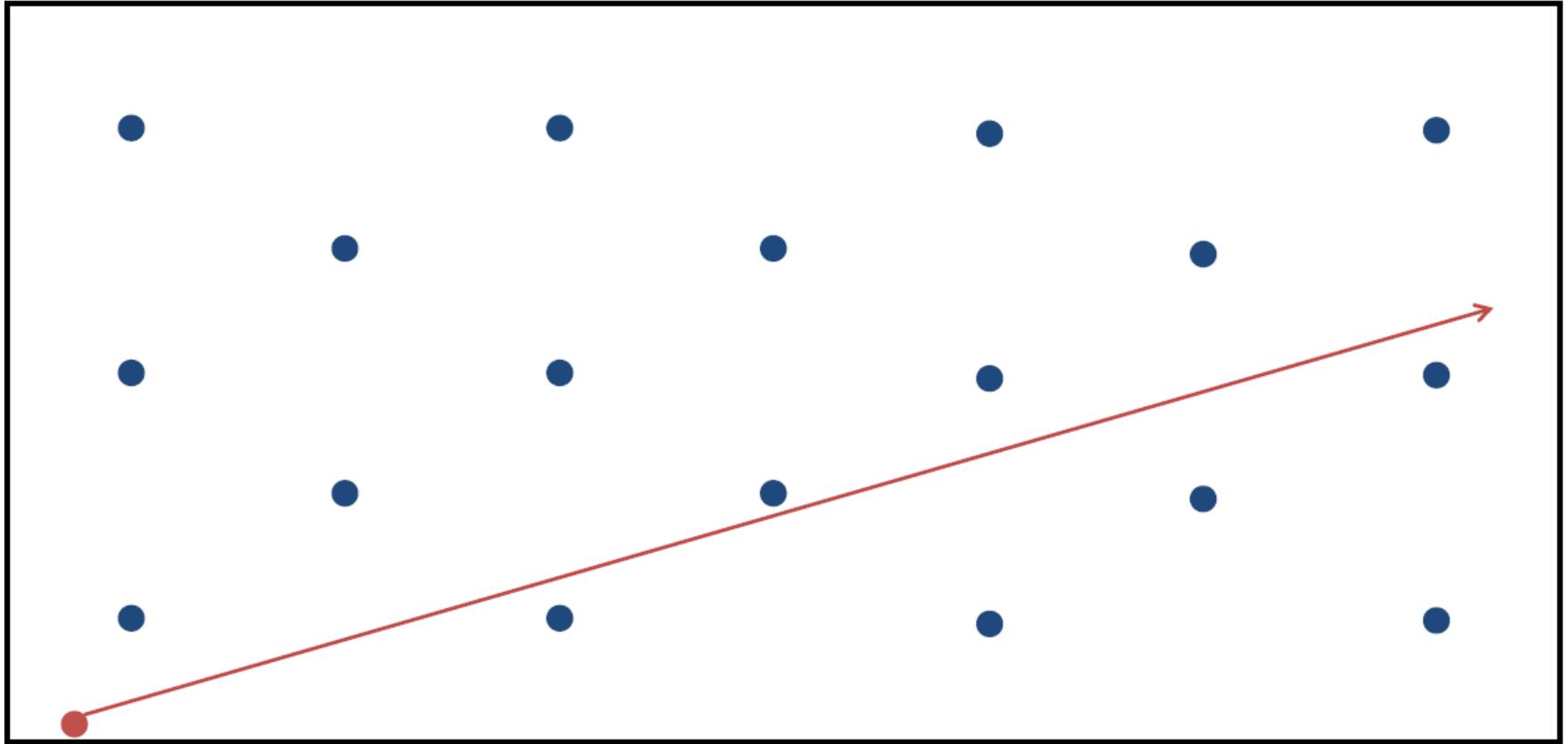
## 1.2 Interaction des neutrons avec la matière



Neutrons neutres => interaction seulement avec les noyaux



## 1.2 Interaction des neutrons avec la matière



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

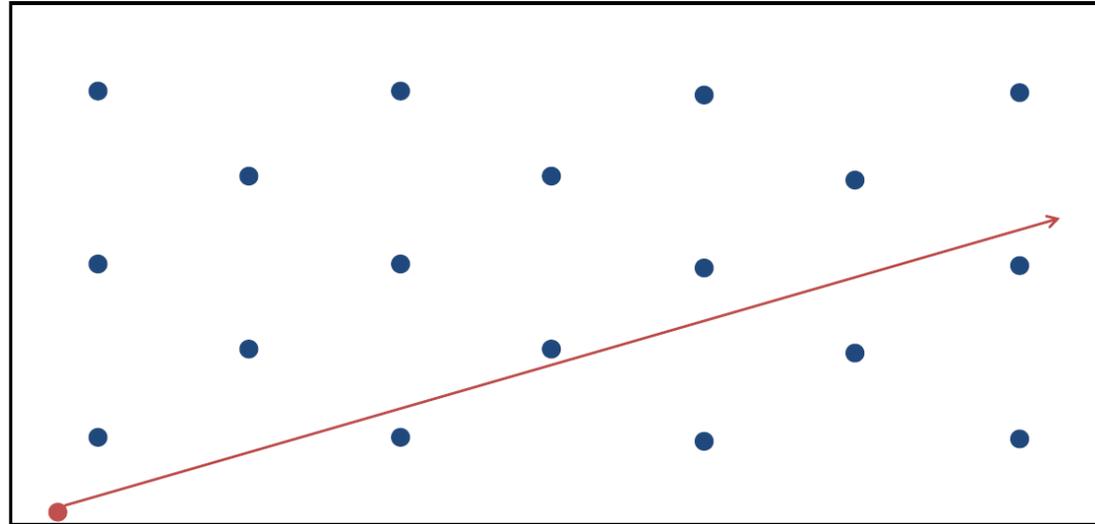
- Pas de système nucléaire de taille « microscopique »



## 1.2 Interaction des neutrons avec la matière

Quand un neutron interagit avec un noyau, possibilités :

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

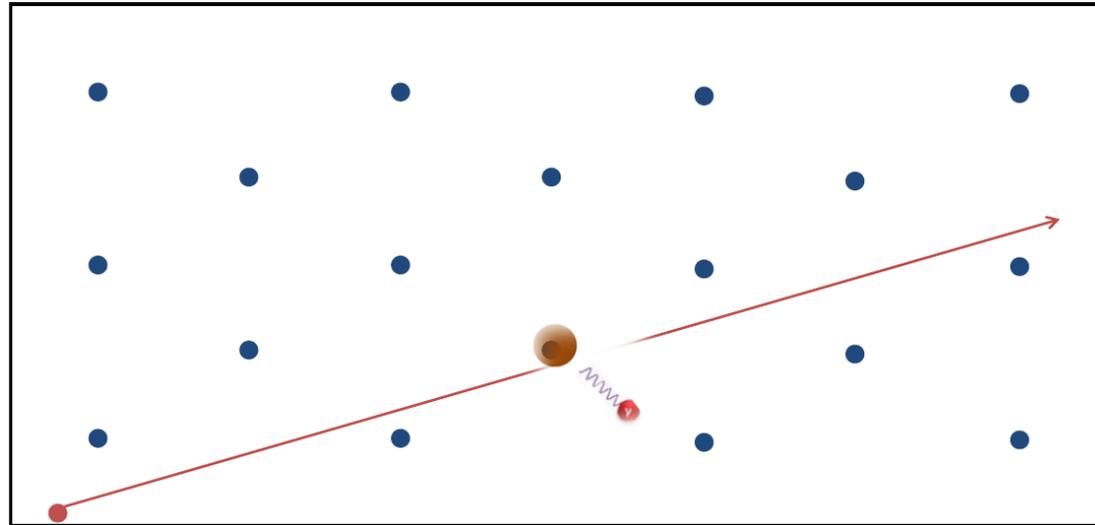




## 1.2 Interaction des neutrons avec la matière

Quand un neutron interagit avec un noyau, possibilités :

1. Choc élastique : le neutron cède une partie de son énergie à la cible
2. 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 naturel sur Terre*



## 1.2 Interaction des neutrons avec la matière

Taux de réaction :

Flux de neutrons (*neutrons. s<sup>-1</sup>. cm<sup>-2</sup>*) (c'est une densité)

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

Densité de noyau *i* (*noyau. cm<sup>-3</sup>*)

$\sigma_{r,i}$  : section efficace de la réaction *r* sur le noyaux *i*

Si on peut négliger les fuites et considérer que les générations sont successives :

$$k = \frac{\text{Production}}{\text{Absorption}} = \frac{\nu R_f}{R_a} = \frac{\sum_i \nu N_i \sigma_{f,i}}{\sum_i N_i \sigma_{a,i}}$$



## 1.2 Interaction des neutrons avec la matière

Taux de réaction :

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

Flux de neutrons (*neutrons. s<sup>-1</sup>. cm<sup>-2</sup>*)

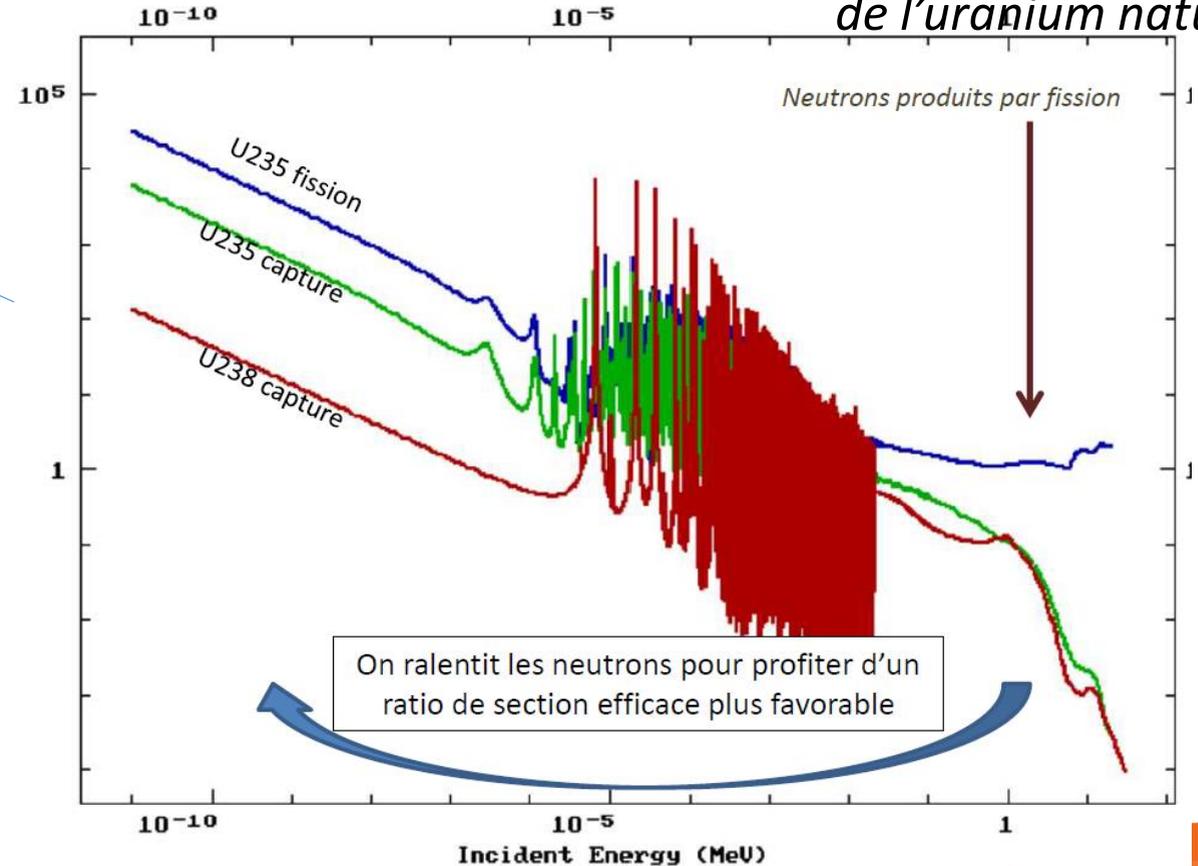
Densité de noyau i (*noyau. cm<sup>-3</sup>*)

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

Pour intégrer l'interaction avec la matière, on considère

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

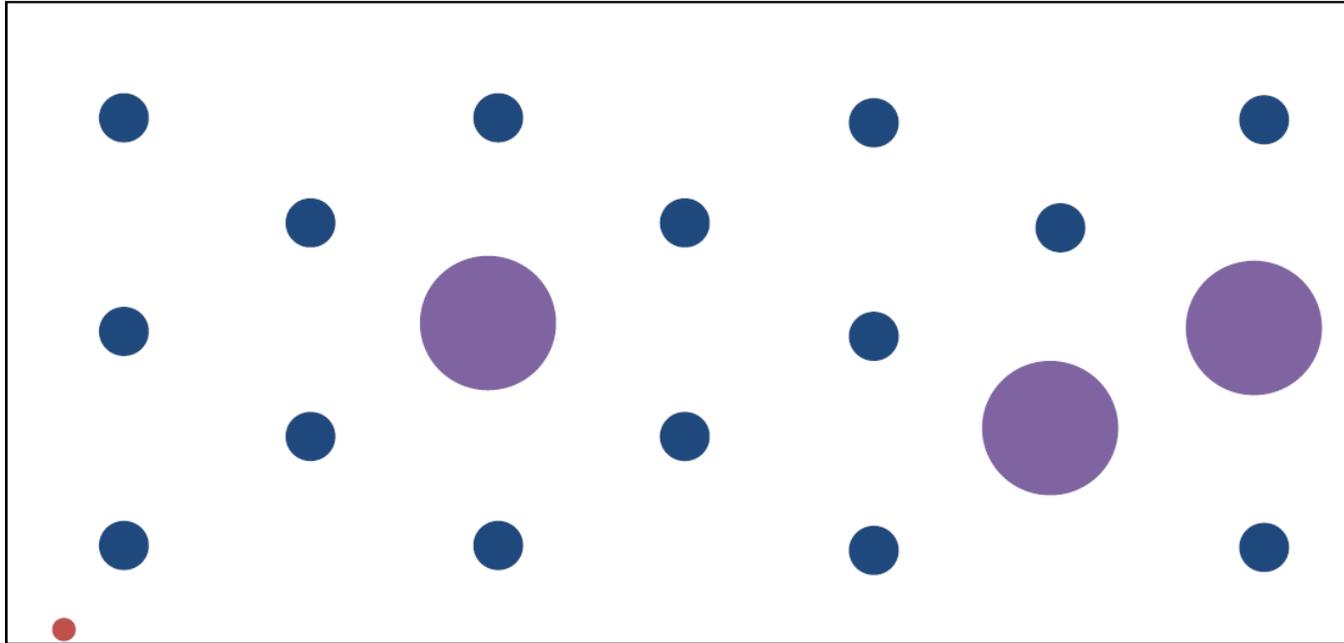
*L'uranium 235 ne représente que 0,7% de l'uranium naturel*





## 1.2 Interaction des neutrons avec la matière

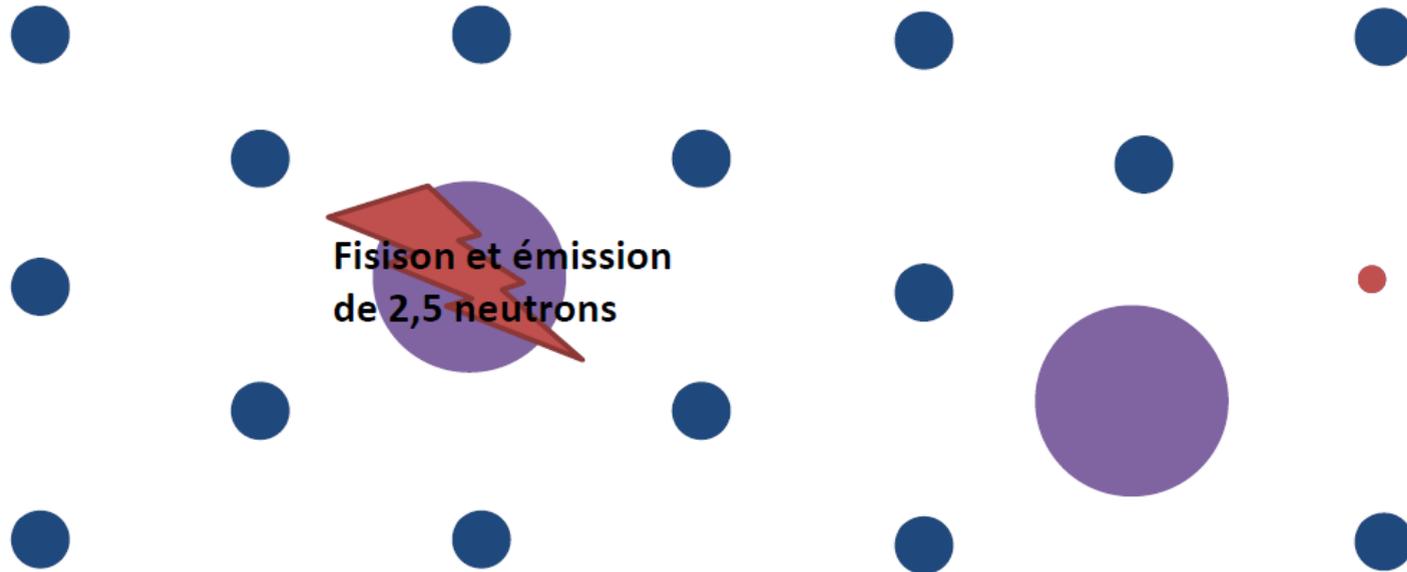
Tout ce passe comme si le volume des noyaux dépendait de la vitesse du neutron  
→ Quand les neutrons sont lents, la taille relative des noyaux d' $^{235}\text{U}$  augmente



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



## 1.2 Interaction des neutrons avec la matière



L'eau dans les réacteurs est indispensable pour :

- Ralentir les neutrons
- Refroidir le combustible

Dans 1 réacteur:

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

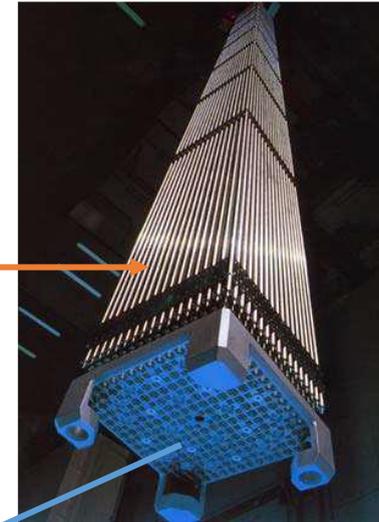
Eau modératrice



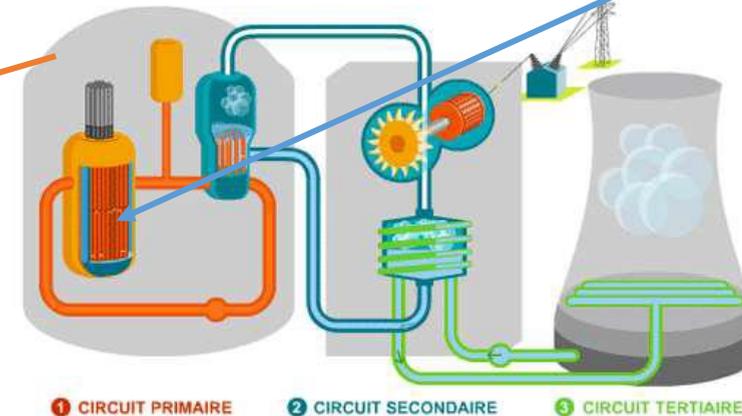
## 1.3 Les réacteurs à eau sous pression

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*





## 1.4 Modélisation des réacteurs

Il faut savoir où sont les neutrons pour savoir où sont les fissions :

➤ Calcul d'un état d'équilibre

Libre parcours moyen des neutrons  $\sim cm$

Section assemblage  $\sim 20 cm \times 20 cm$

Hauteur du cœur  $\sim 4 m$

Énergie des neutrons de  $10^{-3}eV$  à  $10^8eV$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = - \text{div}(\vec{\Omega} \Phi) - \Sigma_{tot} \Phi + \int_{\vec{\Omega}', E'} \Phi' \Sigma' f d\vec{\Omega}' dE' + \int_0^\infty X(E) v \Sigma_f dE$$

Variation du flux  
neutronique

Fuites

Réaction

Réaction de transfert

Source de fission

$$\Sigma = N \cdot \sigma$$

Inconnue :  $\Phi = \Phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$

→ Taux de réaction =  $N \sigma \Phi$

Les sections efficaces sont liées aux propriétés nucléaires fondamentales des nucléides composants les matériaux.



## 1.4 Modélisation des réacteurs

### 2 familles de méthodes pour résoudre ces équations

#### **Déterministe :**

Discrétisation de l'équation.

- Calcul numérique avec des grosses matrices
- Gros besoin de mémoire
- ❖ APOLLO, DRAGON, NEWT,...

#### **Monte-Carlo :**

Propagation d'un grand nombre de particule témoin aléatoire

- Valeurs moyennes représentatives seulement pour grandes statistiques
- Gros besoin de processeur
- ❖ MCNP, SERPENT, TRIPOLI, KENO,...





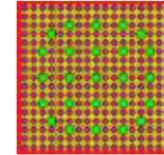
# 1.4 Modélisation des réacteurs

- Espace de résolution (geom et E) trop grand par rapport aux variations lors de 1 génération
- Equation très difficile à résoudre en 1 fois : 1 calcul cœur = 1 thèse
- On fait une rupture d'échelle pour découpler partiellement : 1 calcul cœur en 1 minute

## Calcul cellule

Évolution en fonction du temps d'un assemblage en conditions infinies

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = - \text{div}(\vec{\Omega} \Phi) - \Sigma_{tot} \Phi + \int_{\vec{\Omega}', E'} \Phi' \Sigma' f d\vec{\Omega}' dE' + \int_0^\infty X(E) \nu \Sigma_f dE$$



Angle  $\vec{\Omega}$       Énergie  $E$       Espace  $\vec{r}$

*Approximation de la diffusion*      *condensation*      *homogénéisation*

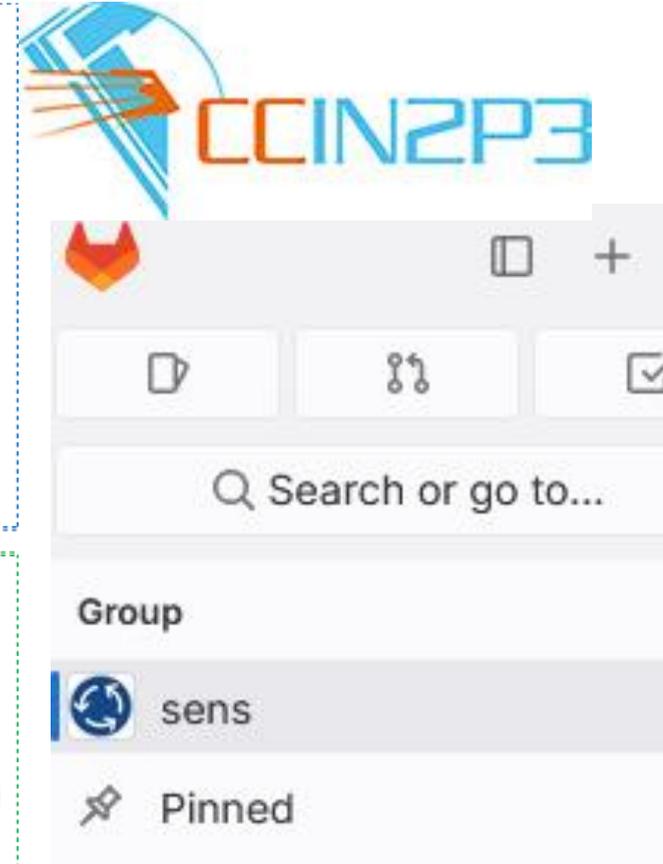
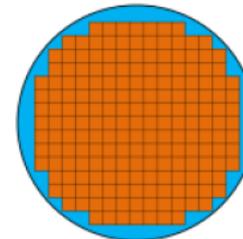
$$\vec{j} = -D \text{grad } \Phi$$

## Calcul cœur

$$-D \Delta \Phi = \nu \Sigma_f \Phi - \Sigma_a \Phi$$

$\Sigma = N \cdot \sigma$

Résolution de l'équation de la diffusion sur le cœur entier critique



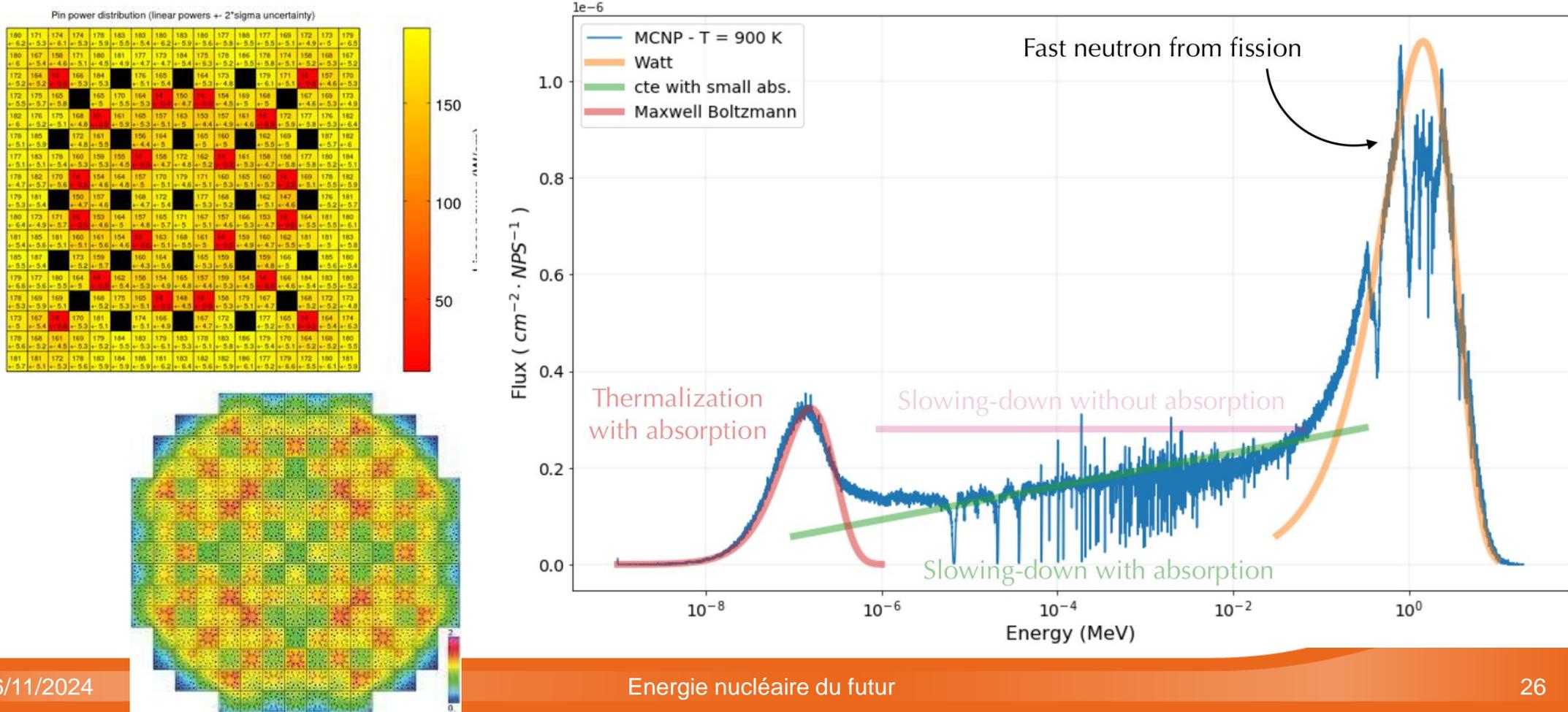


# 1.4 Modélisation des réacteurs

Dans les systèmes suffisamment petits, on arrive à résoudre l'équation :

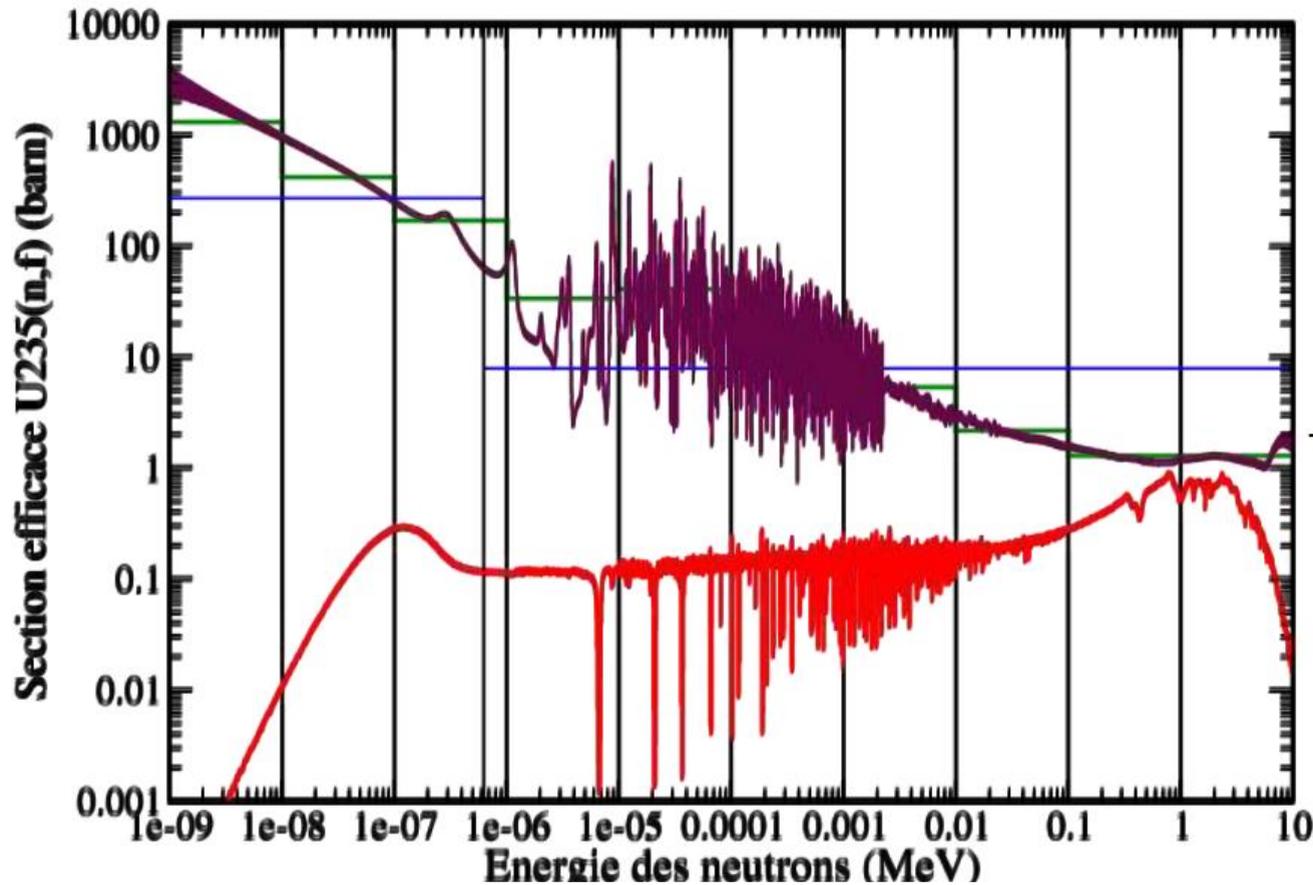
- Répartition spatiale des neutrons : nappe de flux
- Répartition en énergie : spectre

Tout est corrélé avec tout





## 1.4 Modélisation des réacteurs



Section efficace microscopique :

$$\sigma_f^{235U}$$

Flux neutronique :

$$\Phi(E)$$

Au changement d'échelle, on simplifie

➤ Passage en groupes

$$\Phi_g(\vec{r}) = \int_g \Phi(\vec{r}, E) dE$$

$$\sigma_{r,g}(\vec{r}) = \frac{\int_g \sigma_r(E) \Phi(\vec{r}, E) dE}{\int_g \Phi(\vec{r}, E) dE}$$

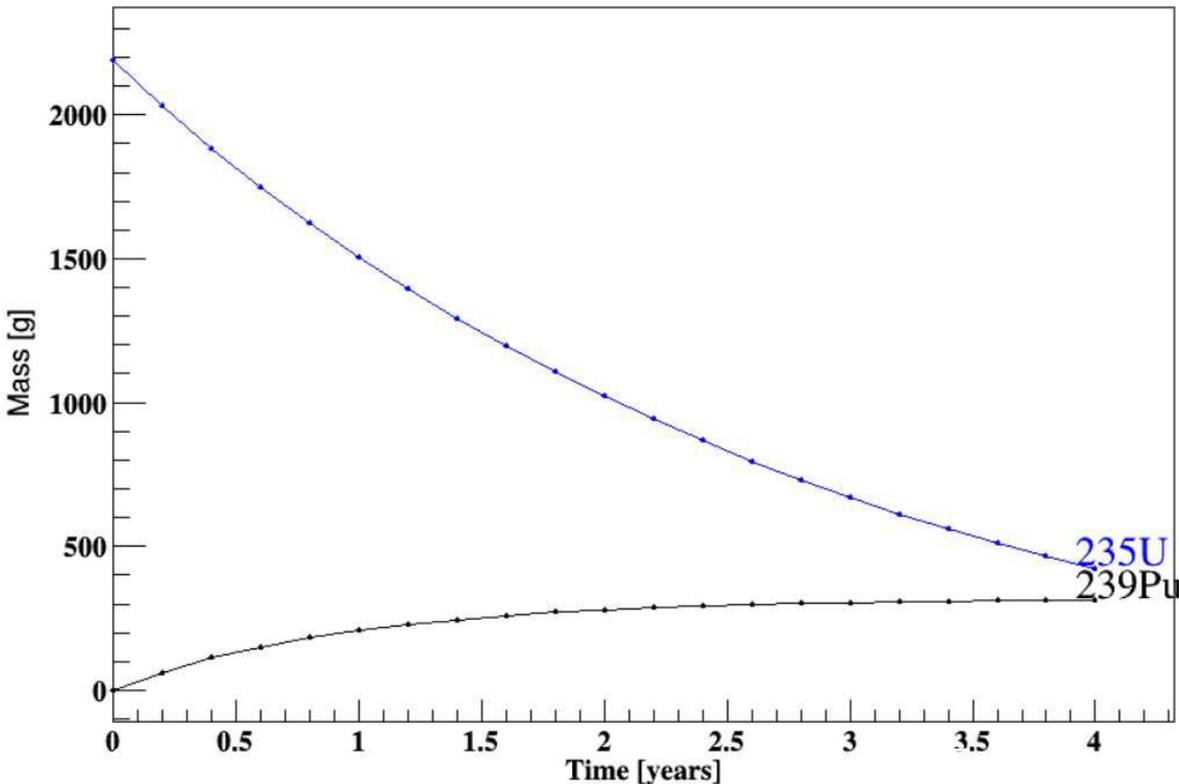
$\Phi(\vec{r}, E)$  doit être calculé au préalable dans un calcul cellule  
Il depend de la composition et de la géométrie



## 1.4 Modélisation des réacteurs

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

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



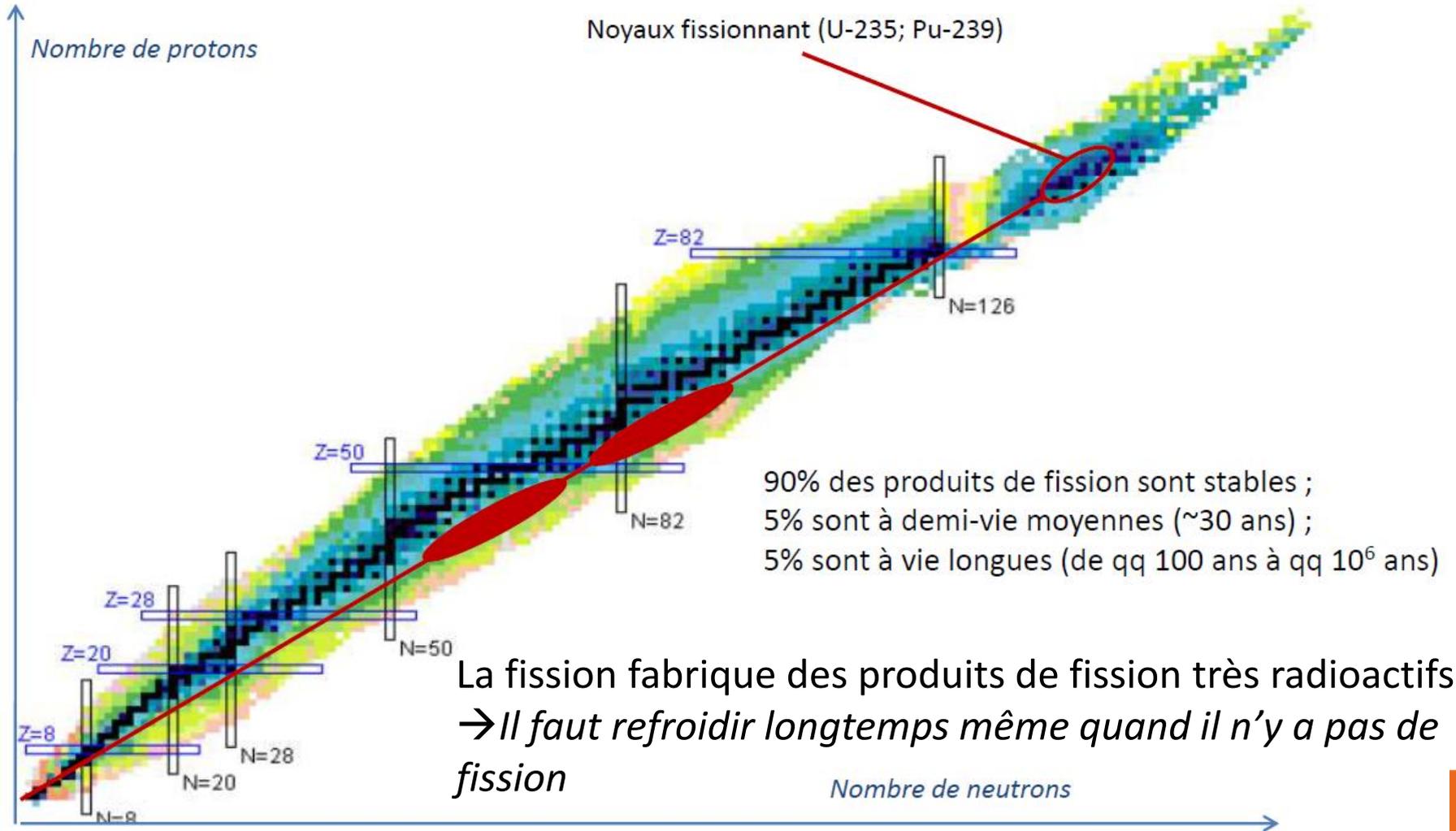
Temps caractéristique : jours/moi/années  
Lent devant le temps neutroniques

Constantes de décroissance  
Distribution de produit de fission

➤ Dépend des propriétés nucléaires des nucléides considérées

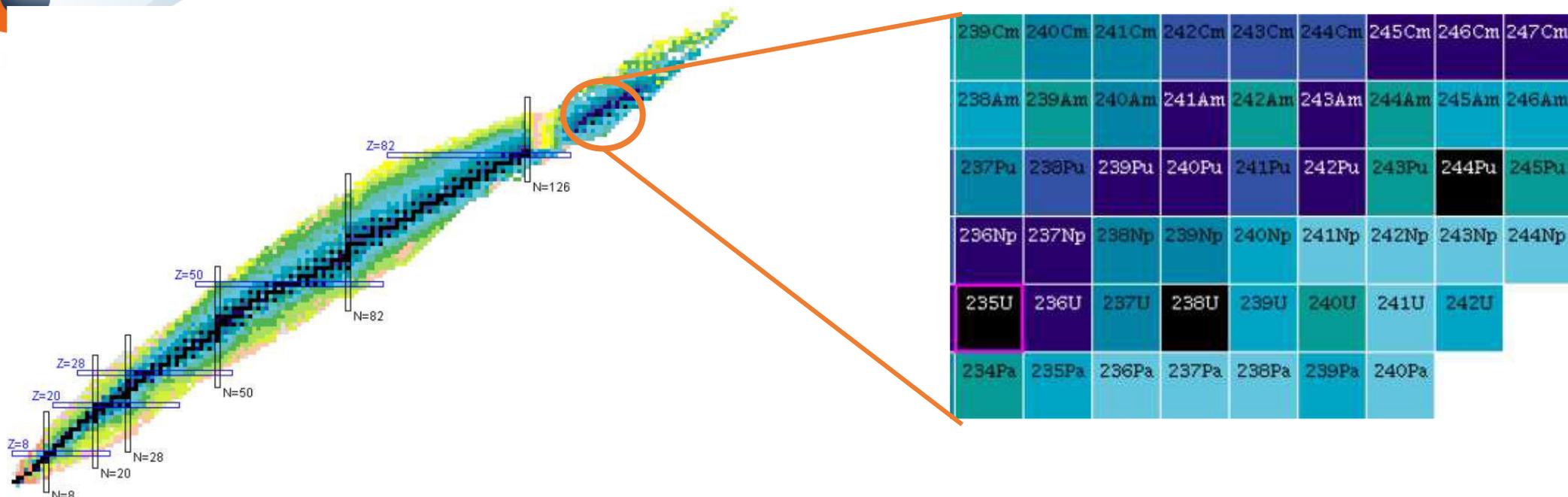


## 1.4 Modélisation des réacteurs





## 1.4 Modélisation des réacteurs



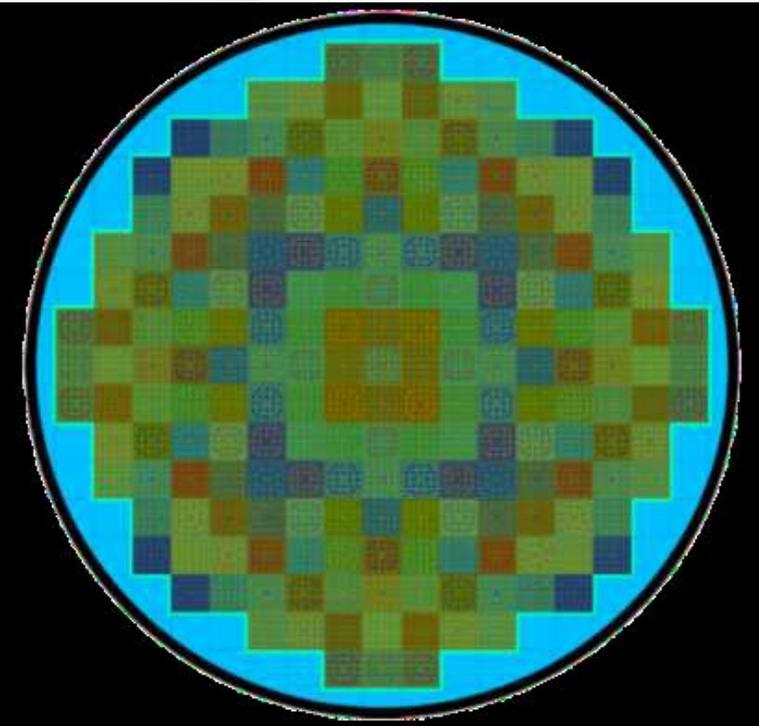
L'irradiation produit des noyaux lourds par captures neutroniques :

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



# 1.4 Modélisation des réacteurs (rappel avant données)

Il faut savoir où sont les neutrons pour savoir où sont les fissions



Libre parcours moyen des neutrons  $\sim cm$

Section assemblage  $\sim 20 cm \times 20 cm$

Hauteur du cœur  $\sim 4 m$

Énergie des neutrons de  $10^{-3}eV$  à  $10^8eV$

$$\frac{1}{v} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = - \text{div}(\vec{\Omega} \Phi) - \Sigma_{tot} \Phi + \int_{\vec{\Omega}', E'} \Phi' \Sigma' f d \vec{\Omega}' dE' + \int_0^\infty X(E) v \Sigma_f dE$$

Variation du flux  
neutronique

Fuites

Réaction

Réaction de transfert

Source de fission

$$\Sigma = N \cdot \sigma$$

Inconnue :  $\Phi = \Phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$

Taux de réaction =  $N \sigma \Phi$

Les sections efficaces sont liées aux propriétés nucléaires fondamentales des nucléides composants les matériaux. => **données nucléaires**



## 1. 5 Données nucléaires

Pour résoudre les équations et faire des prédictions, il faut connaître les propriétés nucléaires fondamentales :

- Sections efficaces  $\sigma_r(E)$
- Constantes de décroissances
- Distributions de produits de fission
- Des modèles évalués : ajustés sur des expériences

Et avec des bonnes précisions sur de larges gammes d'énergie :

ID	View	Target	Reaction	Quantity	Energy range	Sec.E/Angle	Accuracy	Cov Field	Date
2H		8-O-16	(n,a),(n,abs)	SIG	2 MeV-20 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
3H		94-PU-239	(n,f)	prompt g	Thermal-Fast	Eg=0-10MeV	7.5	Y Fission	12-MAY-06
4H		92-U-235	(n,f)	prompt g	Thermal-Fast	Eg=0-10MeV	7.5	Y Fission	12-MAY-06
8H		1-H-2	(n,el)	DA/DE	0.1 MeV-1 MeV	0-180 Deg	5	Y Fission	16-APR-07
15H		95-AM-241	(n,g),(n,tot)	SIG	Thermal-Fast		See details	Fission	10-SEP-08
18H		92-U-238	(n,in1)	SIG	65 keV-20 MeV	Emis spec.	See details	Y Fission	11-SEP-08
19H		94-PU-238	(n,f)	SIG	9 keV-6 MeV		See details	Y Fission	11-SEP-08
21H		95-AM-241	(n,f)	SIG	180 keV-20 MeV		See details	Y Fission	11-SEP-08
22H		95-AM-242M	(n,f)	SIG	0.5 keV-6 MeV		See details	Y Fission	11-SEP-08
25H		96-CM-244	(n,f)	SIG	65 keV-6 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
27H		96-CM-245	(n,f)	SIG	0.5 keV-6 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
32H		94-PU-239	(n,g)	SIG	0.1 eV-1.35 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
33H		94-PU-241	(n,g)	SIG	0.1 eV-1.35 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
34H		26-FE-56	(n,in1)	SIG	0.5 MeV-20 MeV	Emis spec.	See details	Y Fission	12-SEP-08
35H		94-PU-241	(n,f)	SIG	0.5 eV-1.35 MeV		See details	Y Fission	12-SEP-08
37H		94-PU-240	(n,f)	SIG	0.5 keV-5 MeV		See details	Y Fission	15-SEP-08
38H		94-PU-240	(n,f)	suban	200 keV-2 MeV		See details	Y Fission	15-SEP-08



# 1. 5 Données nucléaires

Pour résoudre les équations et faire des prédictions, il faut connaître les propriétés nucléaires fondamentales :

- Sections efficaces  $\sigma_r(E)$
- Constantes de décroissances
- Distributions de produits de fission
- ...

Et avec des bonnes précisions sur de larges gammes d'énergie :

ID	View	Target	Request ID	32	Energy range	Sec.E/Angle	Accuracy	Cov	Field	Date	
2H		8-O-16	Target	Reaction and process	Incident Energy	-20 MeV	See details	Y	Fission	12-SEP-08	
3H		94-PU-239	94-PU-239	(n,g) SIG	0.1 eV-1.35 MeV	Eg=0-10MeV	7.5	Y	Fission	12-MAY-06	
4H		92-U-235				Eg=0-10MeV	7.5	Y	Fission	12-MAY-06	
8H		1-H-2	Field	Subfield	Created date	V-1 MeV	0-180 Deg	5	Y	Fission	16-APR-07
15H		95-AM-241	Fission	Fast Reactors (VHTR)	04-APR-08		See details		Fission	10-SEP-08	
18H		92-U-238		(n, in1)	SIG						
19H		94-PU-238		(n, f)	SIG						
21H		95-AM-241		(n, f)	SIG						
22H		95-AM-242M		(n, f)	SIG						
25H		96-CM-244		(n, f)	SIG	0.498 - 1.35 MeV					
27H		96-CM-245		(n, f)	SIG	183 - 498 keV					
32H		94-PU-239		(n, g)	SIG	67.4 - 183 keV					
33H		94-PU-241		(n, g)	SIG	24.8 - 67.4 keV					
34H		26-FE-56		(n, in1)	SIG	9.12 - 24.8 keV					
35H		94-PU-241		(n, f)	SIG	2.03 - 9.12 keV					
37H		94-PU-240		(n, f)	SIG						
38H		94-PU-240		(n, f)	SIG						

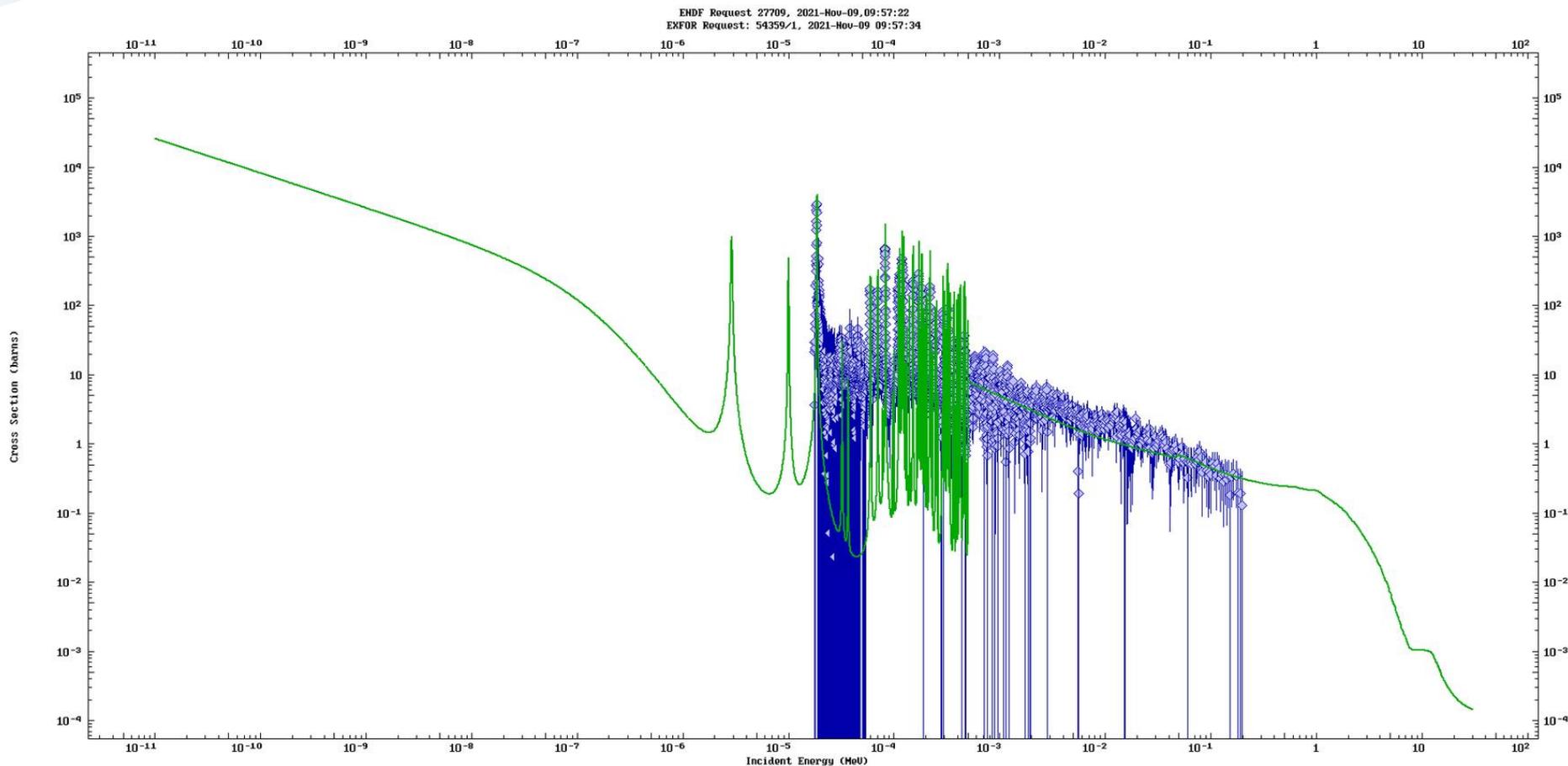
  

Energy Range		Initial versus target uncertainties (%)															
	Initial	ABTR			SFR			EFR		GFR		LFR		ADMAB		VHTR	
		$\lambda=1$	$\lambda=1,a$	$\lambda=1,b$	$\lambda=1$	$\lambda=1,a$	$\lambda=1,b$	$\lambda=1$	$\lambda=1,a$								
0.498 - 1.35 MeV	18	10	7	5	11	8	7	7	5			7	5	7	5		
183 - 498 keV	12	6	4	3	7	5	4	5	4			4	3	5	4		
67.4 - 183 keV	9	5	4	3	6	4	4	5	3	6	4	4	3	5	3		
24.8 - 67.4 keV	10	6	4	3	7	5	4	5	4	5	4	5	3	5	4		
9.12 - 24.8 keV	7	6	4	3	6	4	4	5	3	4	3	5	3	5	3		
2.03 - 9.12 keV	16	7	5	4	7	5	4	4	3	3	2	6	4	4	3		



# 1. 5 Données nucléaires

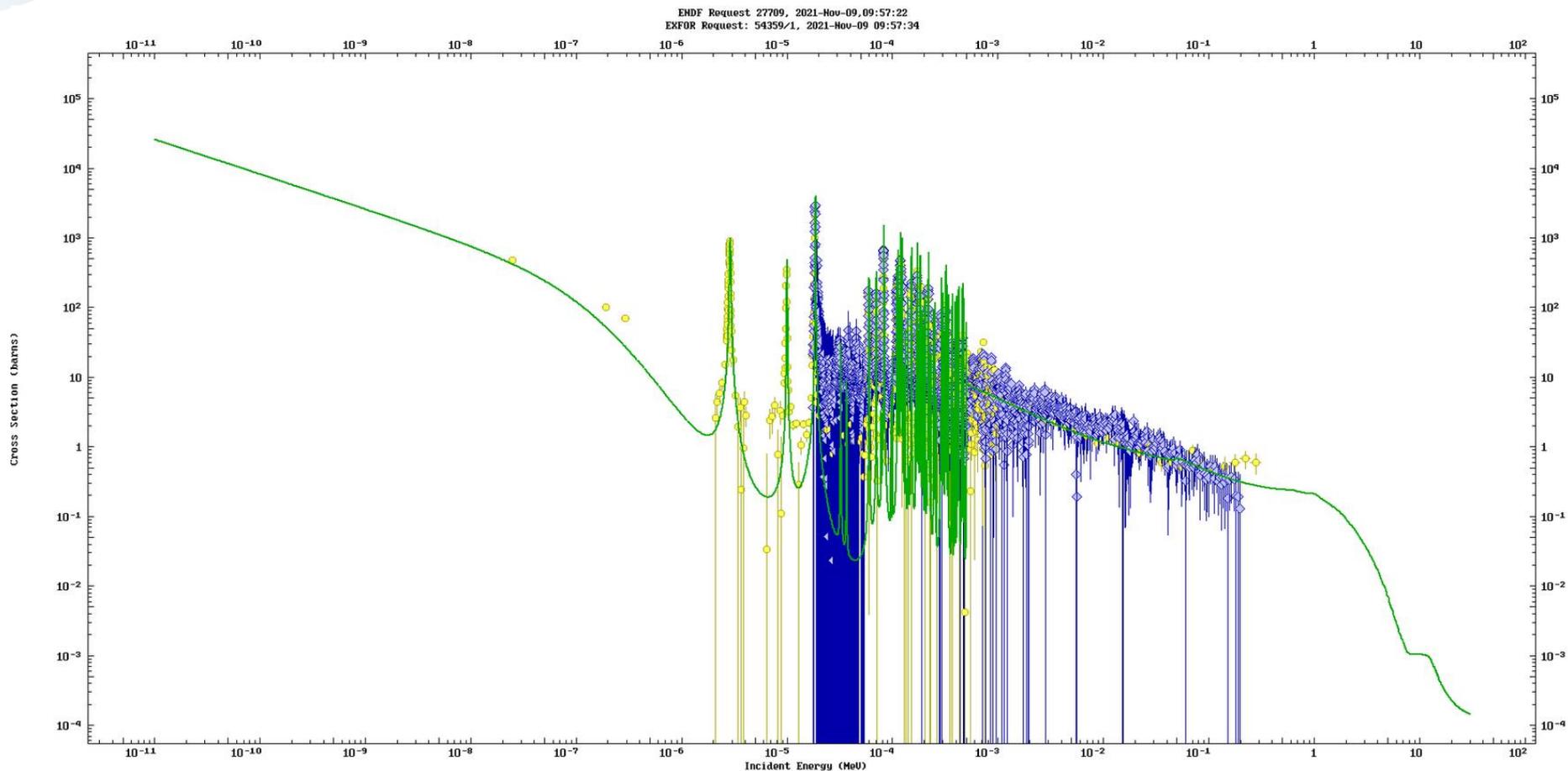
Il y a encore des trous dans la raquette :  $^{238}\text{Pu}$  en 2013





# 1. 5 Données nucléaires

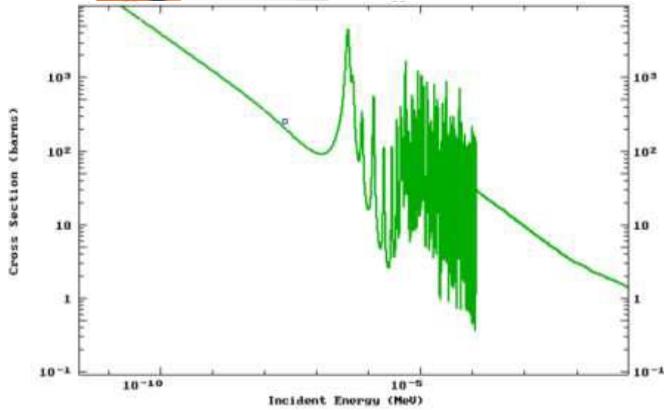
Il y a encore des trous dans la raquette :  $^{238}\text{Pu}$  en 2013



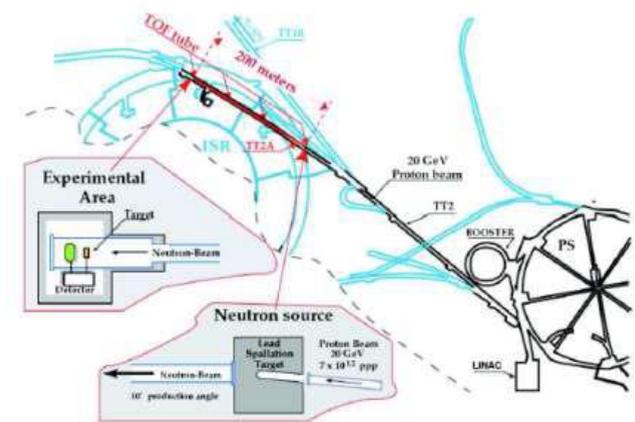


# 1. 5 Données nucléaires

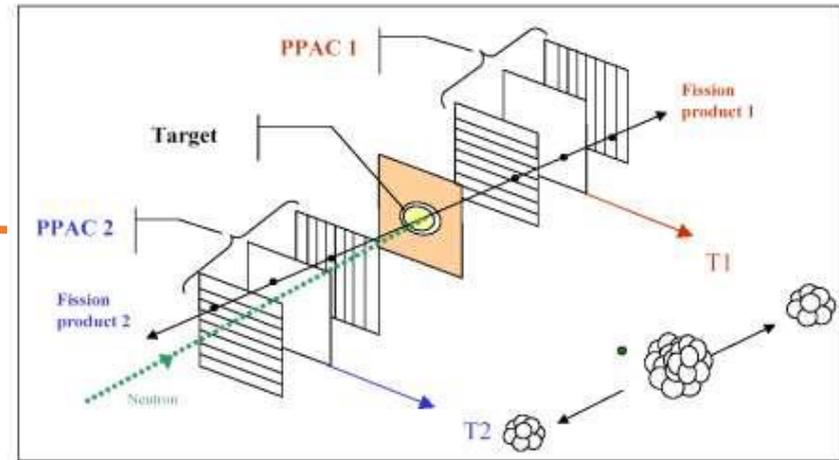
Il faut donc faire des mesures



Identification d'un manque



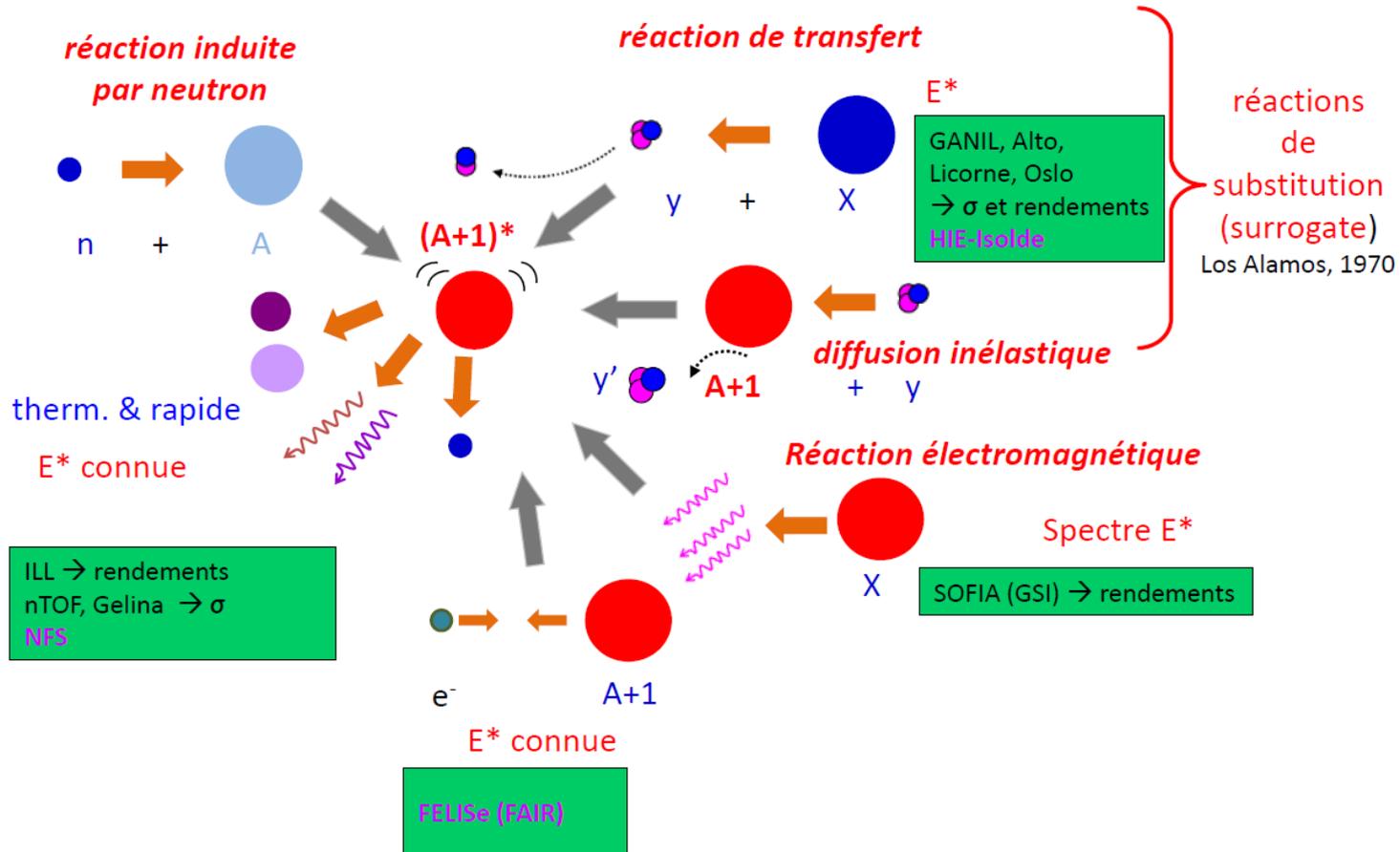
Installations disponibles





# 1. 5 Données nucléaires

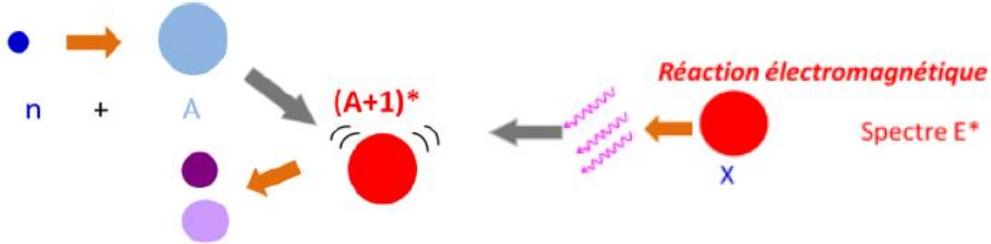
## Nombreuses méthodes



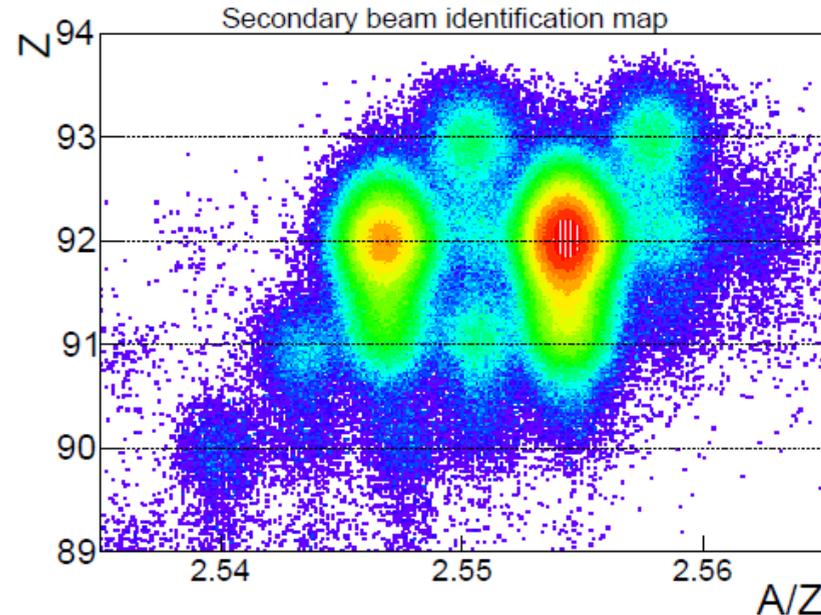
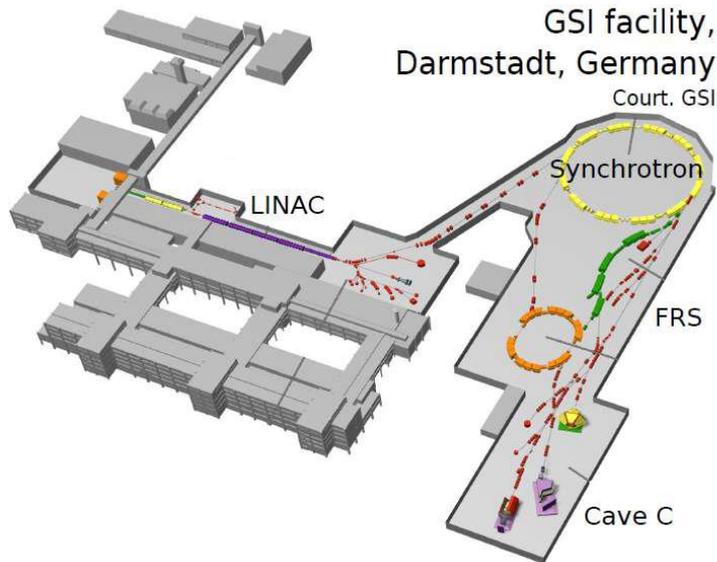


# 1. 5 Données nucléaires : SOFIA

## SOFIA : Study of Fission in Inverse kinematics in ALADIN @GSI

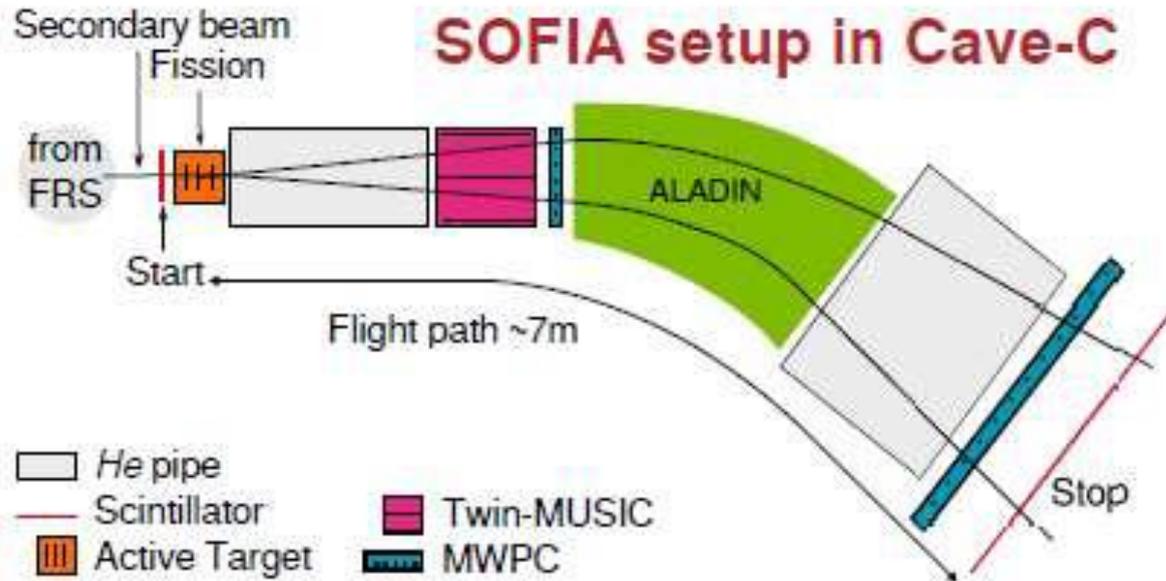


### Fission électromagnétique en cinématique inverse





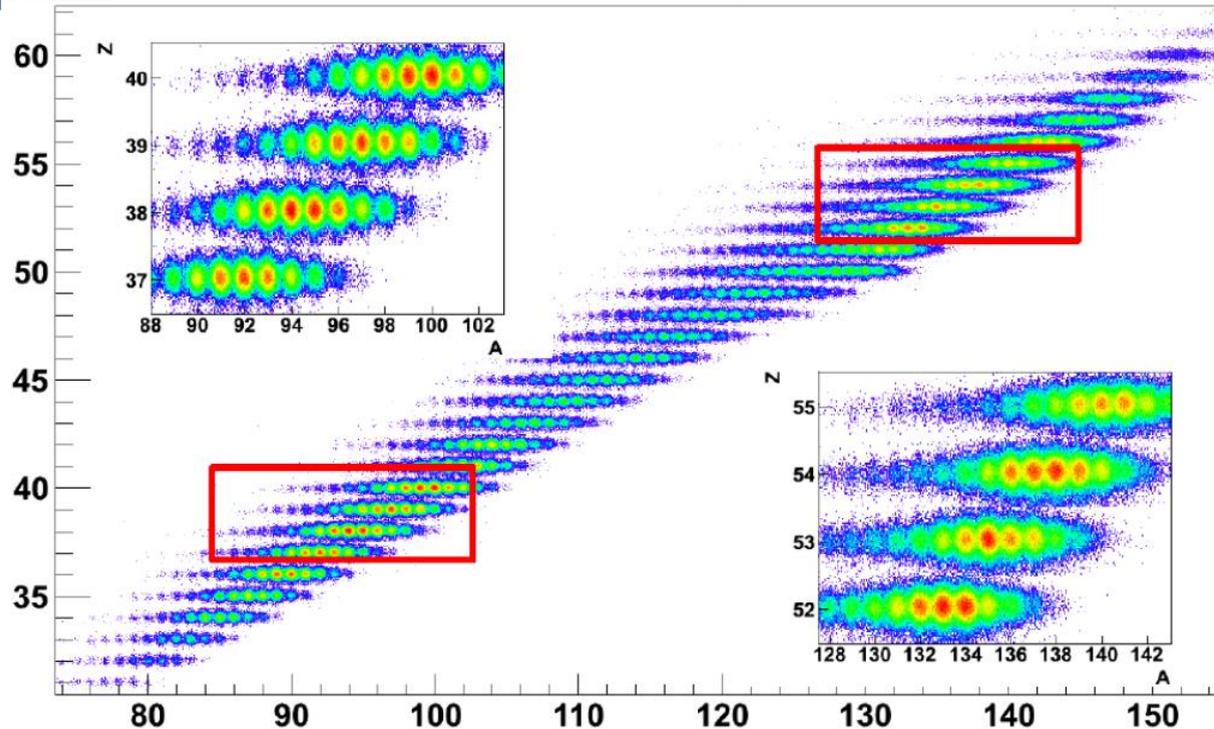
## 1. 5 Données nucléaires : SOFIA



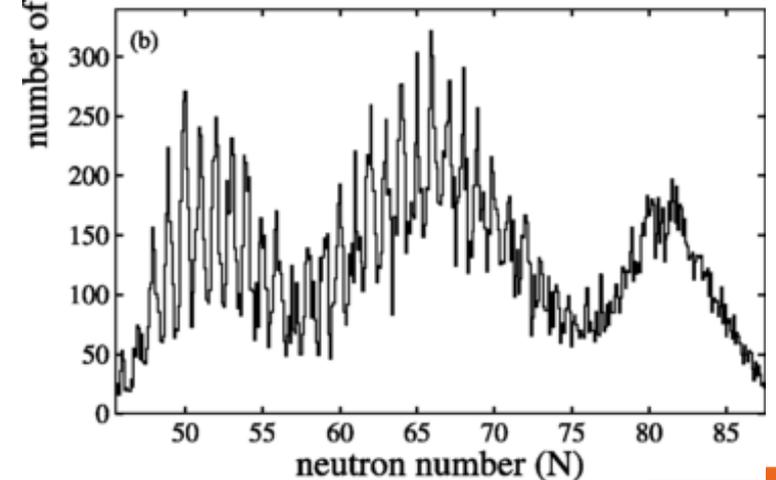
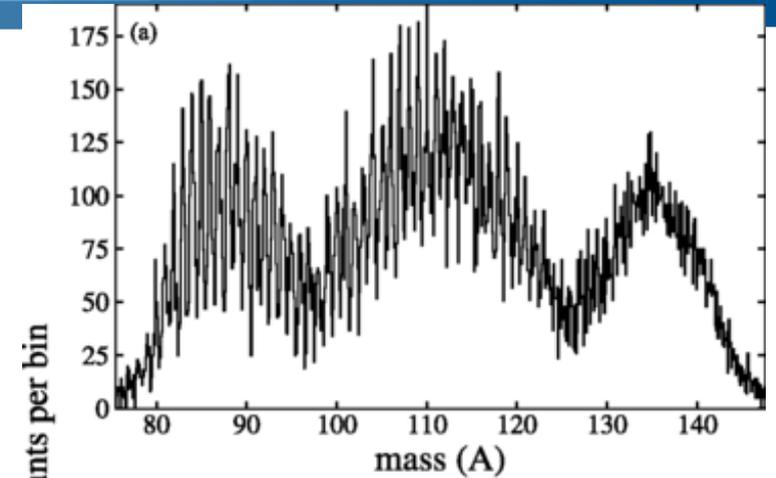
Twin-Music = Chambre à ionisation (mesure de la charge)

- MWPC (Multi-Wire Proportional Chamber) = Mesure de position pour ( $B\rho$ )
- ToF = Mesure de la vitesse
- ➔ On mesure la charge et le nombre de masse des deux fragments en même temps !

# 1. 5 Données nucléaires : SOFIA

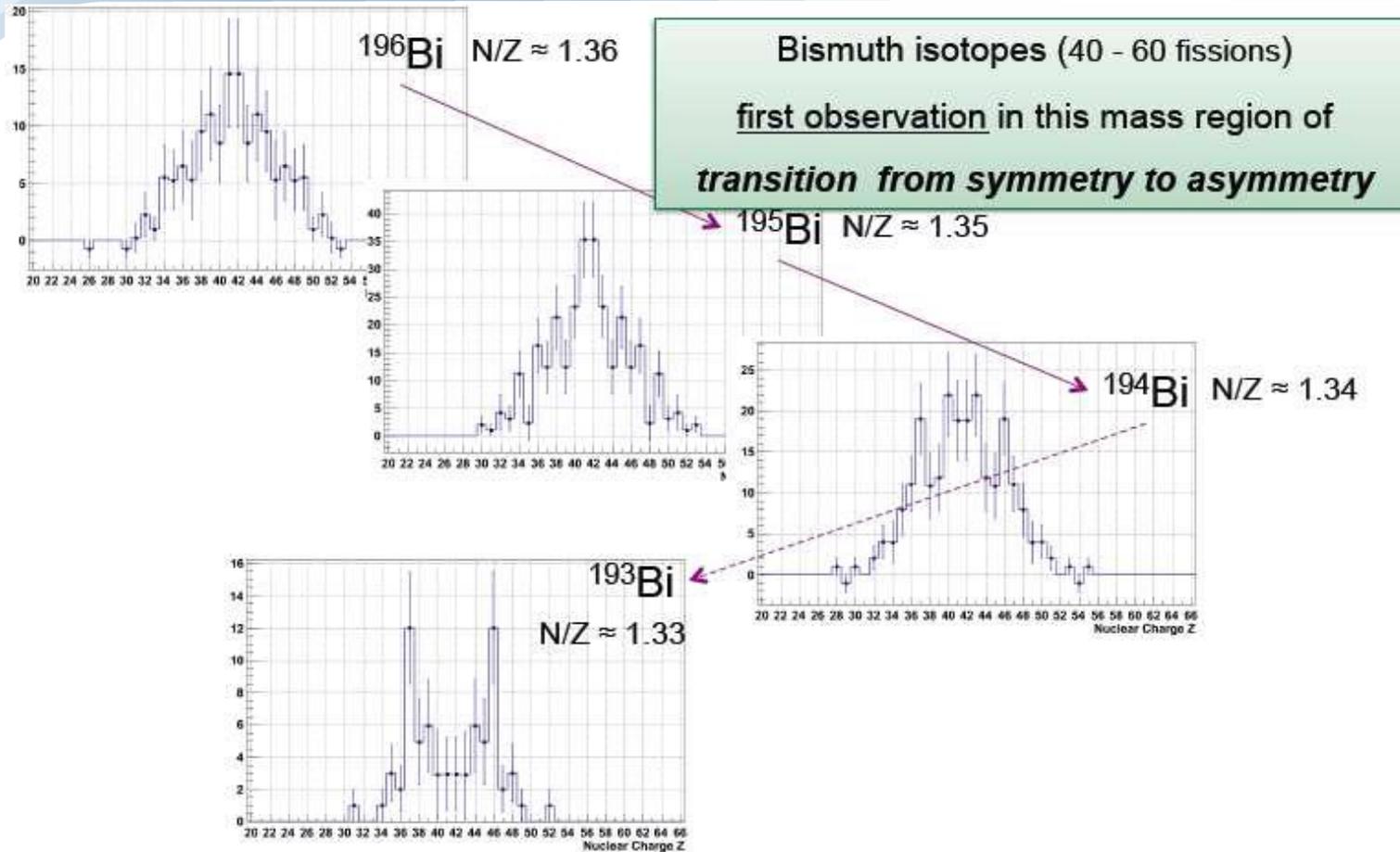


Grace à la haute précision, on peut même reconstruire les binômes de produits de fissions et ainsi recalculer le nombre de neutrons





# 1. 5 Données nucléaires: SOFIA



Les mesures conçues pour les données nucléaires conduisent parfois à des retours à de la physique nucléaire plus fondamentale

# Energie nucléaire du futur : Quelles questions? Quelle recherche?

Partie 2/2

Marc Ernoult

IJCLab, CNRS-IN2P3 / Université Paris-Saclay



# Plan du cours

- **Introduction**

1. **Physique nucléaire et physique des réacteurs**

1. Fission, réaction en chaîne et criticité
2. Interaction neutron matière
3. Réacteur à eau pressurisés
4. Modélisation des réacteurs
5. Importance des données nucléaires

2. **Les déchets nucléaires**

1. Qu'est ce qu'un déchet nucléaire ?
2. Solutions de gestion des déchet
3. Intérêt de la stratégie française

3. **Recyclage et ressources en uranium naturel**

1. Valorisation du plutonium
2. Pourquoi la 4<sup>e</sup> génération?

4. **La transmutation**

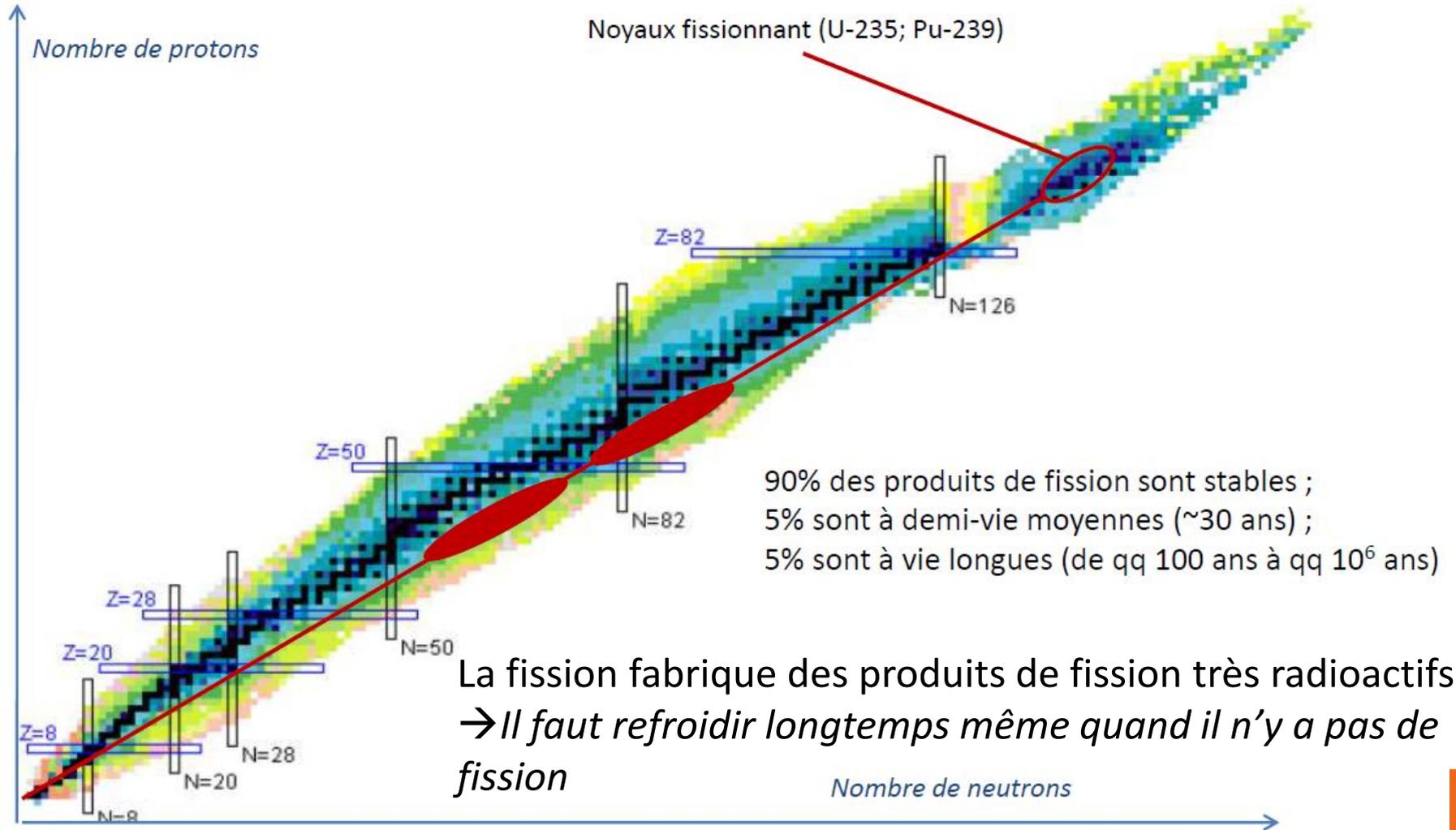
1. Principe et objectifs
2. Possibilités techniques
3. Relation avec le stockage

- **Conclusions**

- Quelques ordres de grandeurs
- Réfléchir globalement : rôle des scénarios

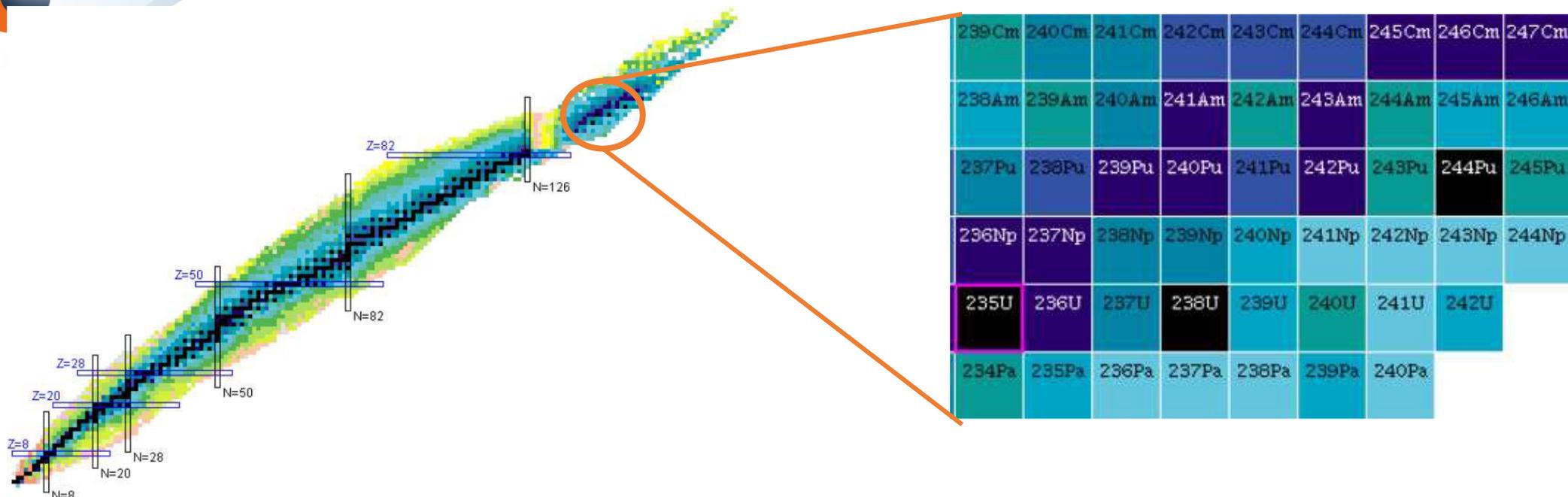


## 1.4 Modélisation des réacteurs (rappel avant déchets)





## 1.4 Modélisation des réacteurs (rappel)

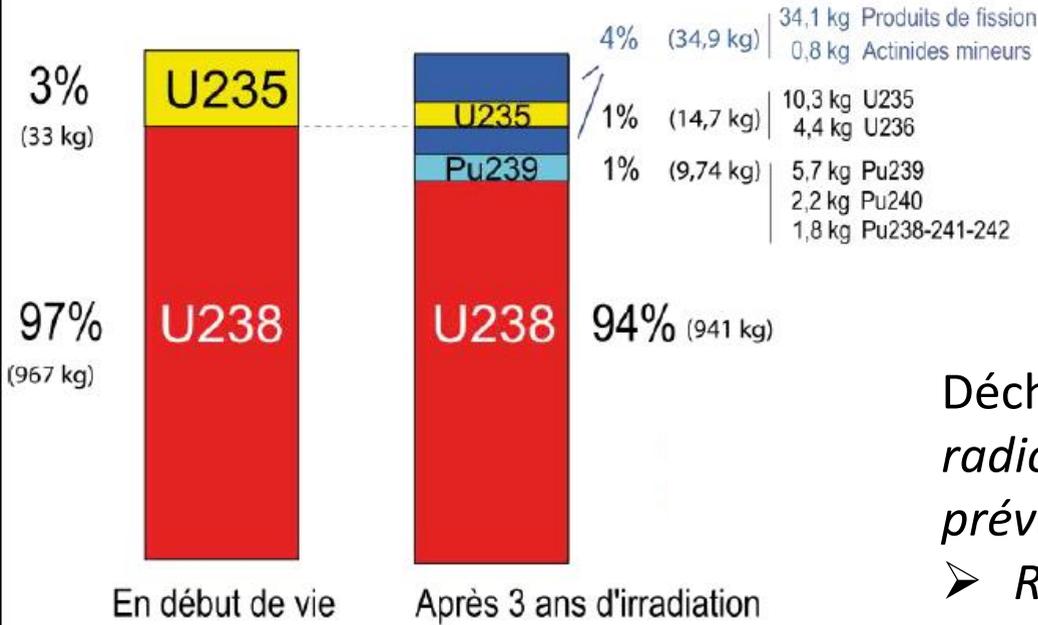


L'irradiation produit des noyaux lourds par captures neutroniques :

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



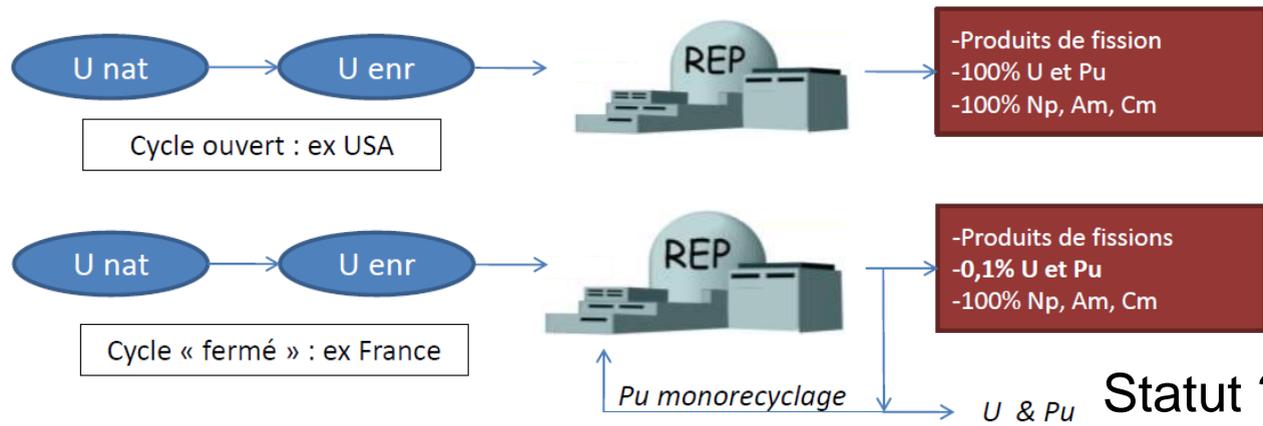
# 2.1 Déchets nucléaires



« 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

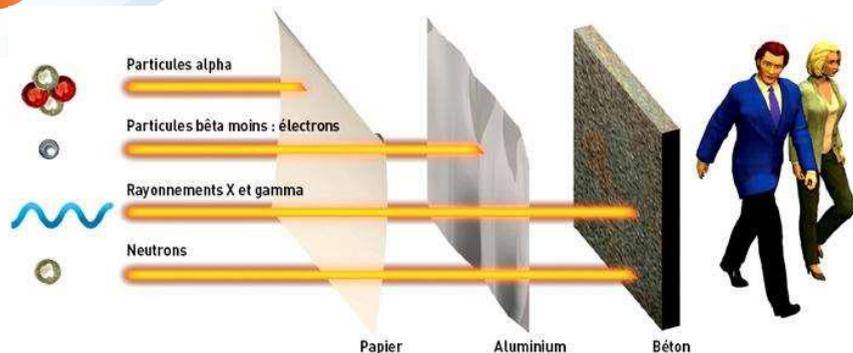


Statut ?



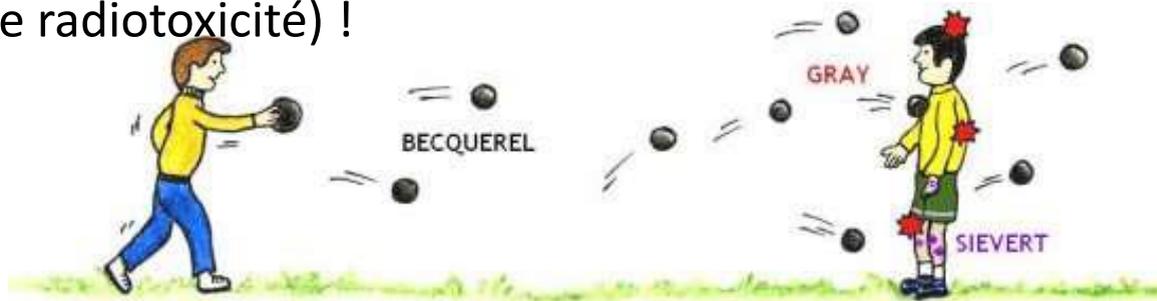
## 2.1 Déchets nucléaires : Quantification radiotoxicité

Comment qualifier les déchets nucléaires ?

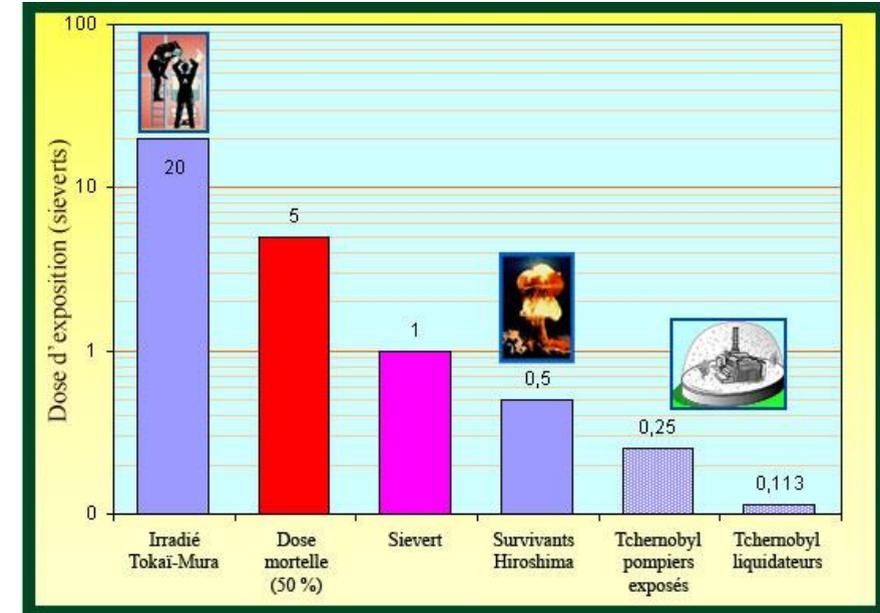
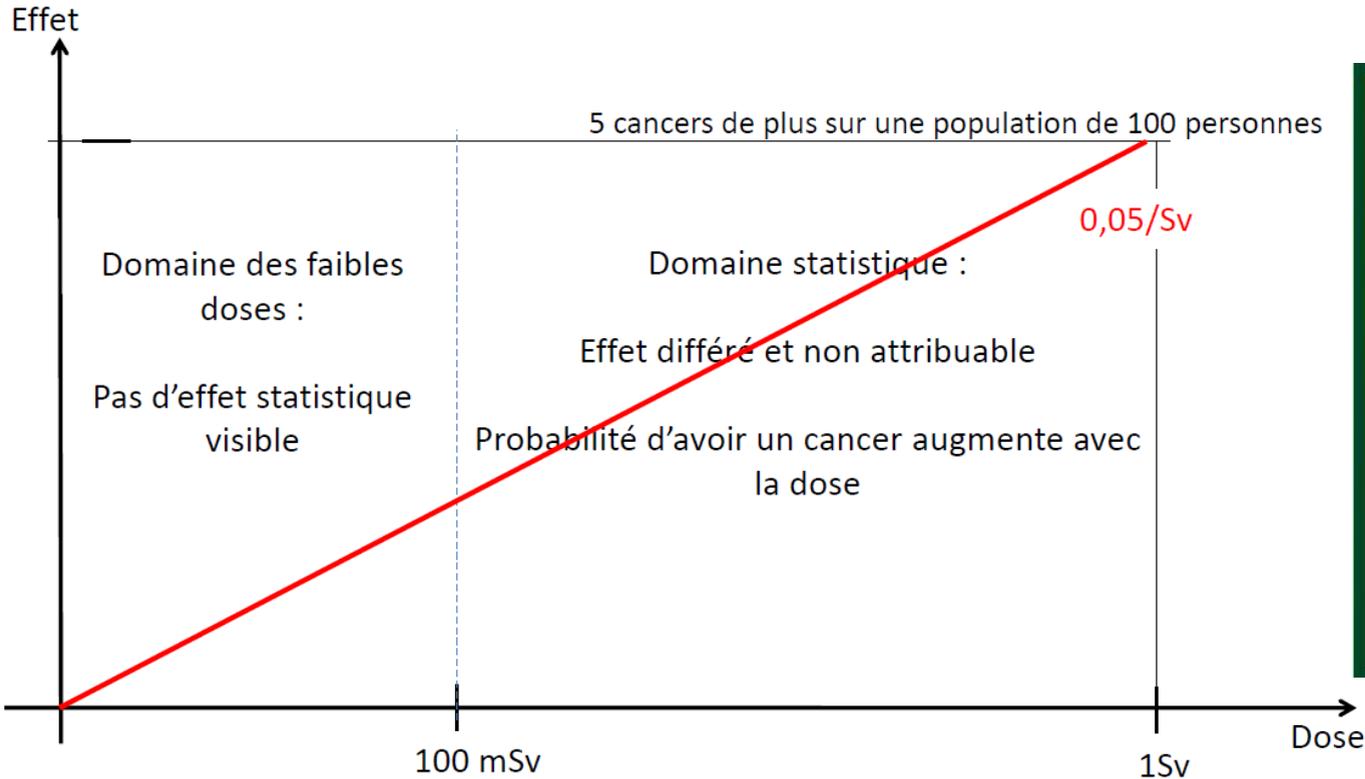


*Spécificité : radioactivité,  
rayonnement ionisant due à la décroissance*

- Unité de la radioactivité : le Becquerel → Activité de l'homme :  $\sim 1000$  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 (unité de radiotoxicité) !



## 2.1 Déchets nucléaires : Quantification radiotoxicité

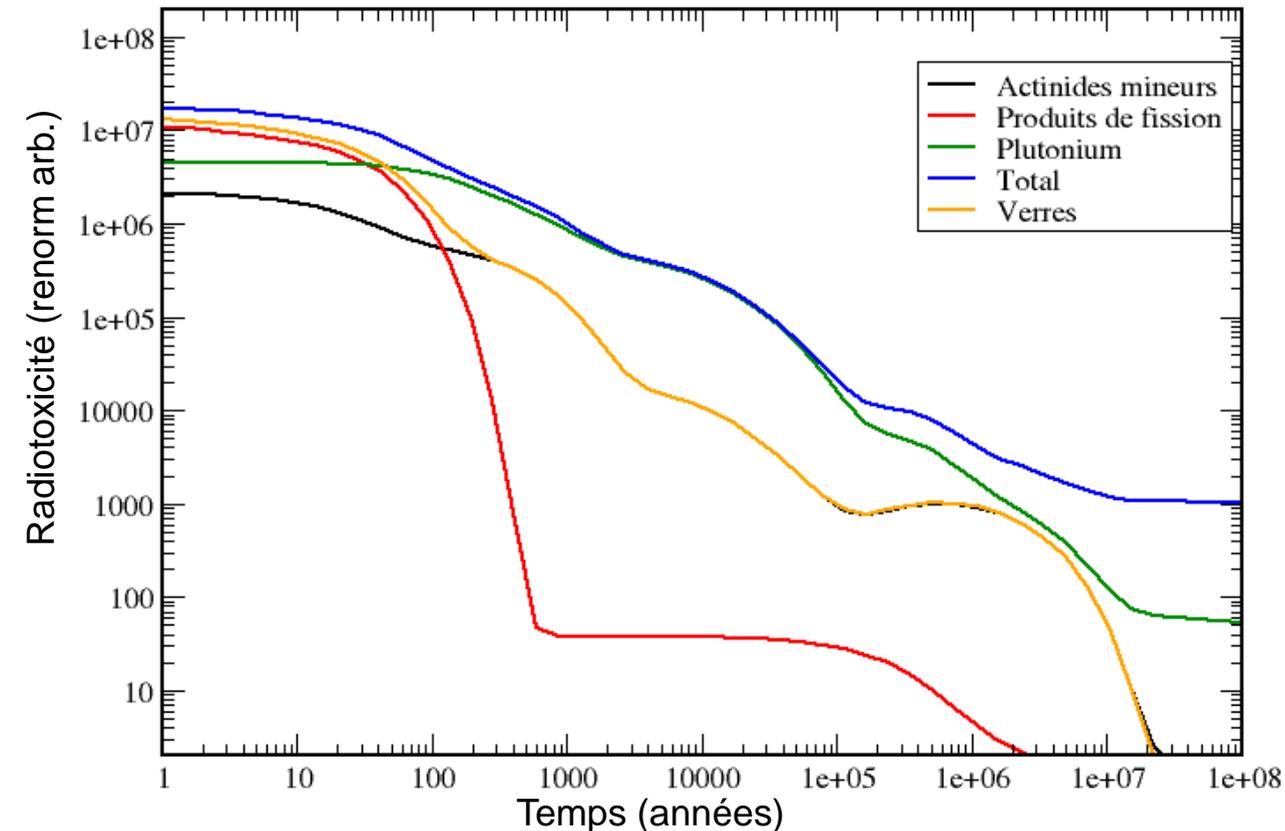


La commission internationale de protection radiologique (CIPR) fait l'hypothèse que l'effet reste proportionnel à la dose  
Pour les fortes doses reçues en peu de temps, il y a en plus brûlure radiative



## 2.1 Déchets nucléaires : Quantification radiotoxicité

*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  $10^5$ ,  $10^6$  années

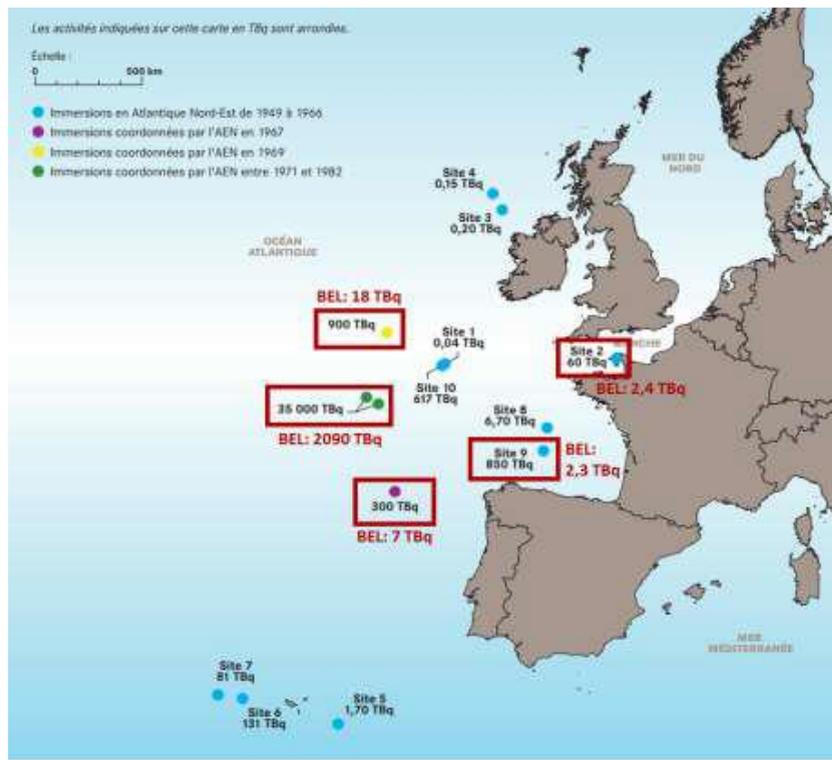


## 2.2 Solutions de gestion des déchets

On a été très mauvais!!

La France (comme tous les pays nucléarisés) a participé à des campagnes d'immersions de déchets nucléaires  
- Stratégie de dilution lente

*123 000 colis, 150 000 tonnes  
Activité totale:  $42 \cdot 10^{15}$  TBq en  $\alpha$*





## 2.2 Solutions de gestion des déchets

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 expert pour expliquer les conséquences de chaque choix proposé

Solution actuellement retenue :

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

Autres solutions envisagées :

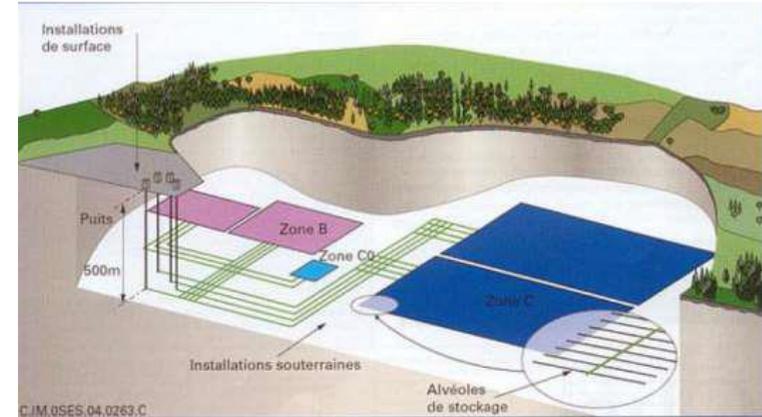
- Entreposage sous surveillance
- Stockage en sub-surface
- Transmutation poussée

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

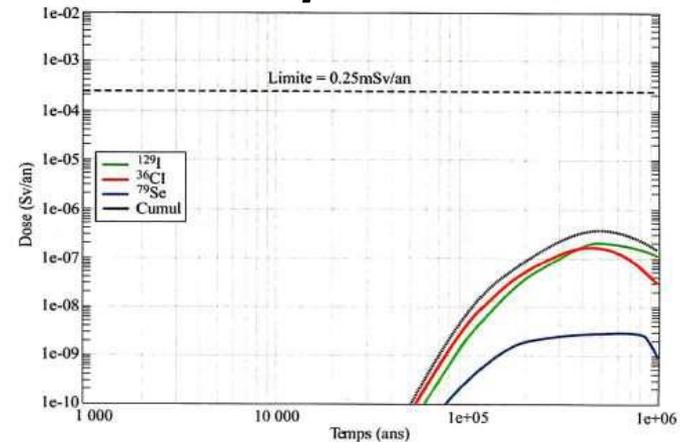
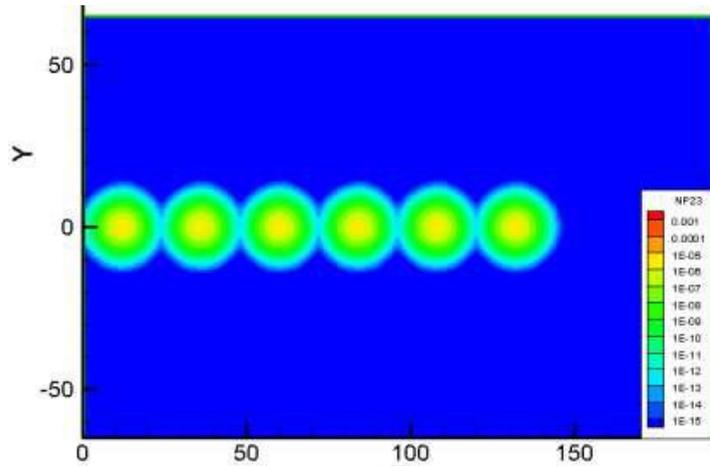


## 2.2 Solutions de gestion des déchets

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



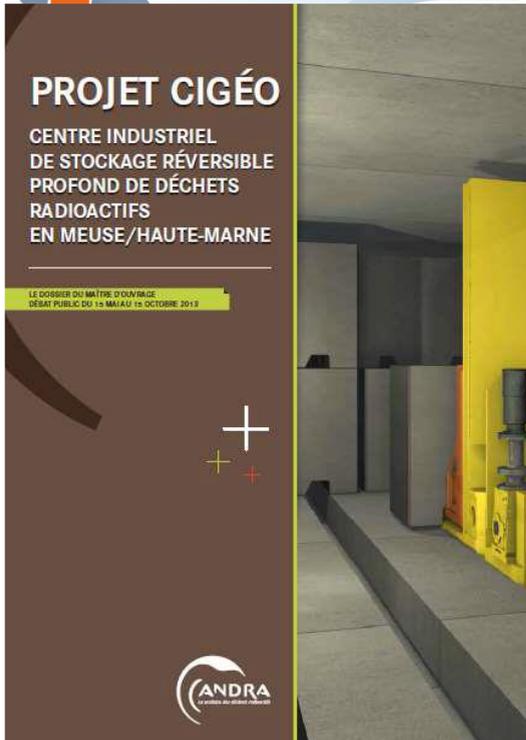
**Est-ce sur ? Les simulations disent que oui**



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

Dose maximale à la surface du au stockage

## 2.2 Solutions de gestion des déchets



L'inventaire prévu pour CIGEO :

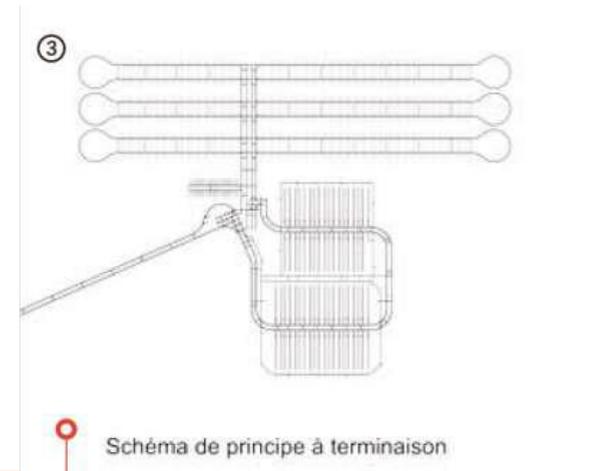
**CIGEO ne concerne que** les déchets produits et « à produire » des **réacteurs actuels**

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

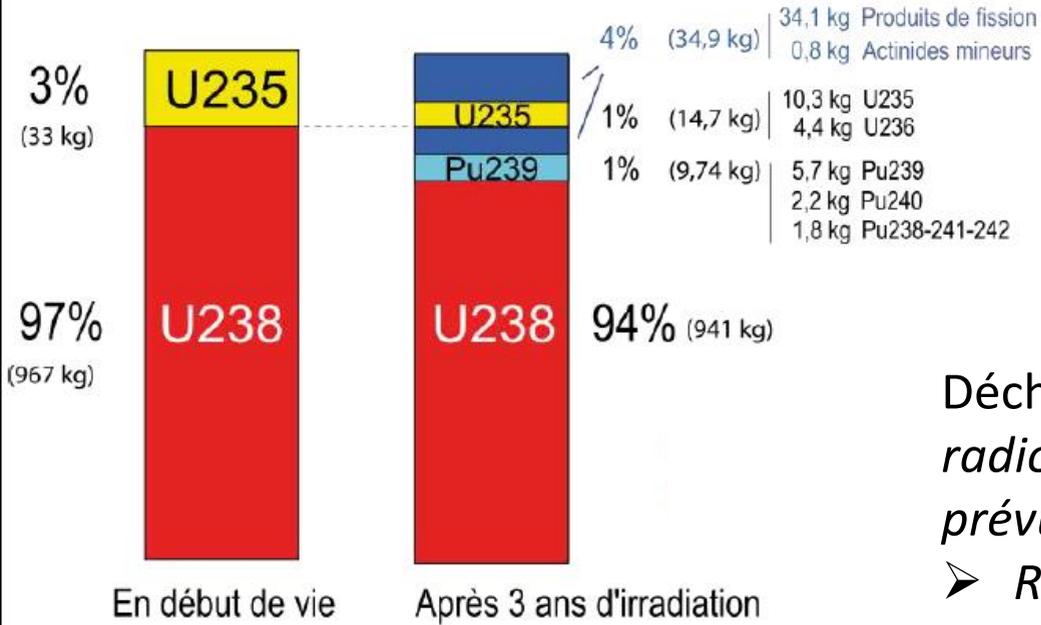
La surface total représente environ 15 km<sup>2</sup> à terme

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 !



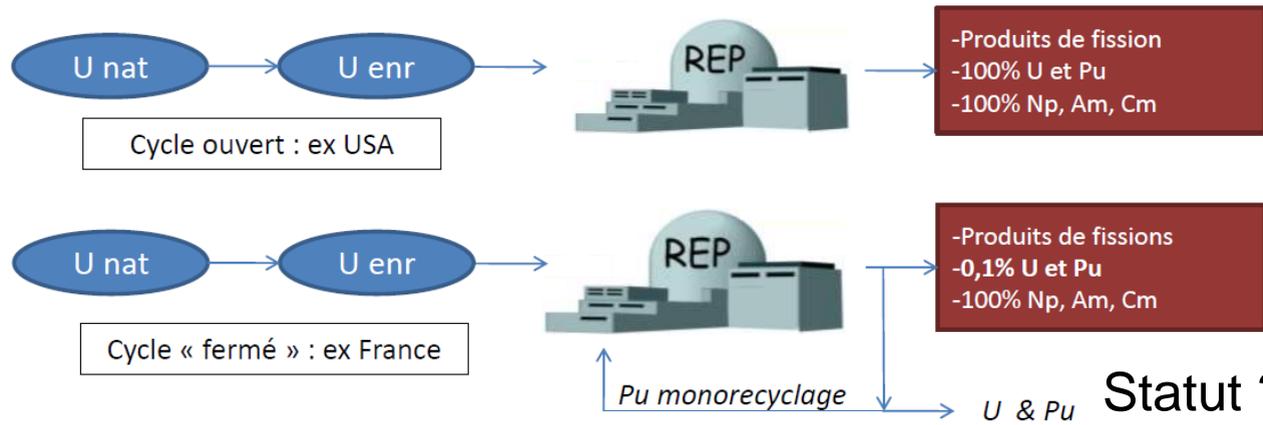
## 2.1 Déchets nucléaires (rappel)



« 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

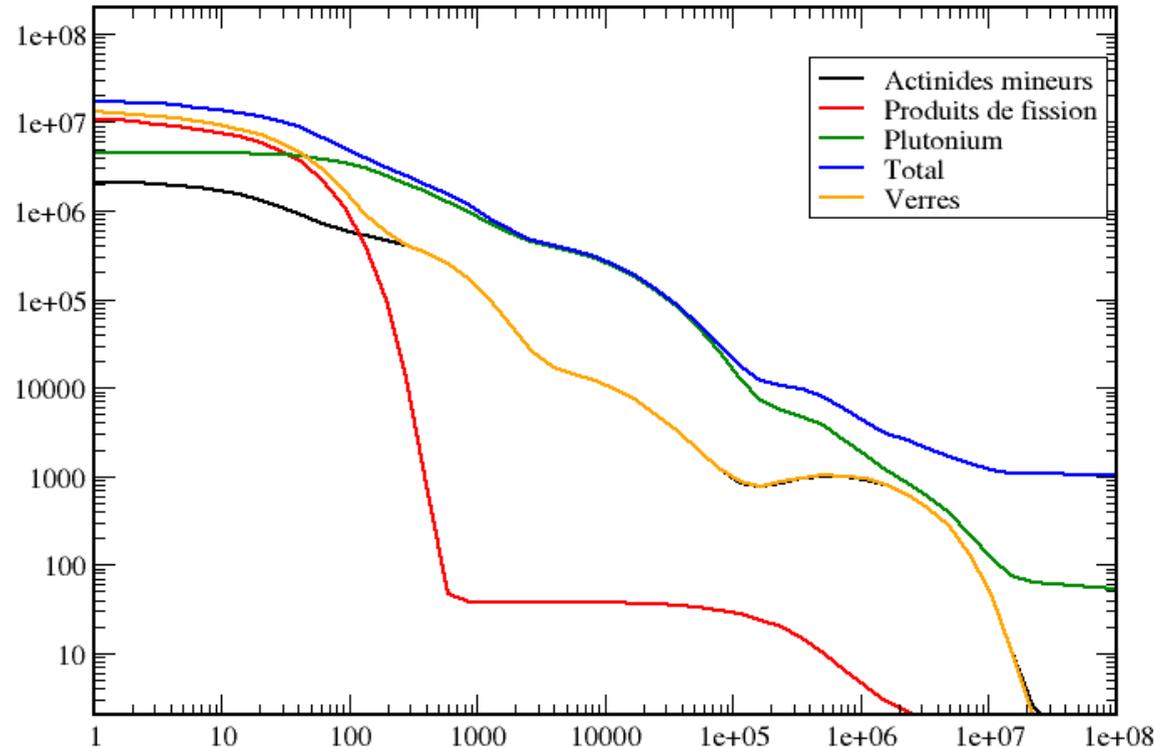




## 2.3 Analyse de la stratégie française du MOX

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 on fait des RNR on a pas assez  
Si c'est un déchet on a en a déjà trop

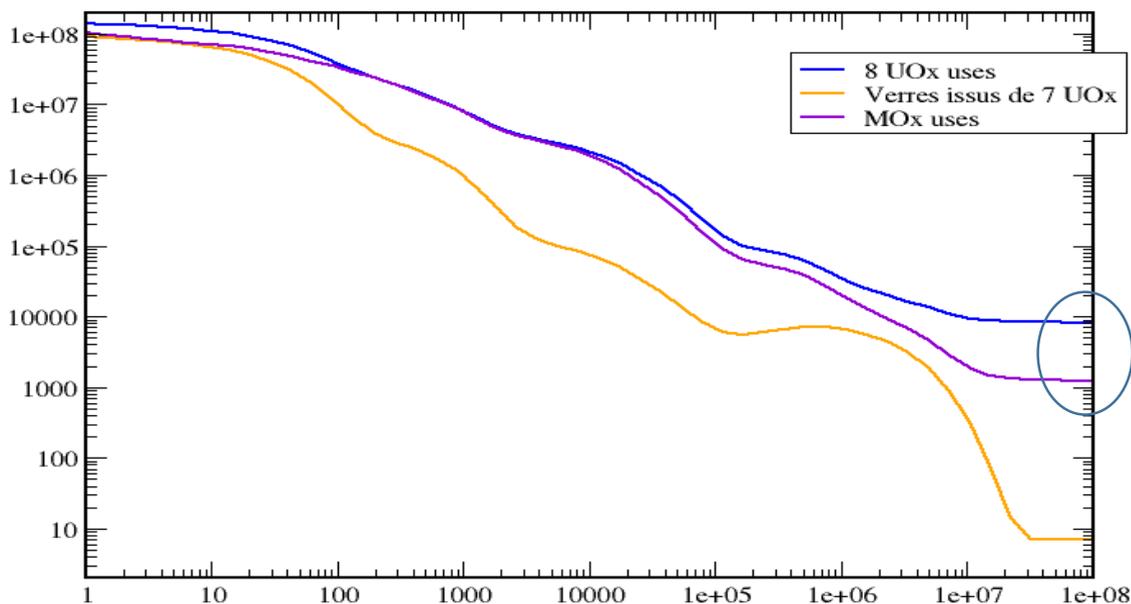
**Faut-il considérer le Pu comme : déchet principal/ressource précieuse ?**



## 2.3 Analyse de la stratégie française du MOX

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

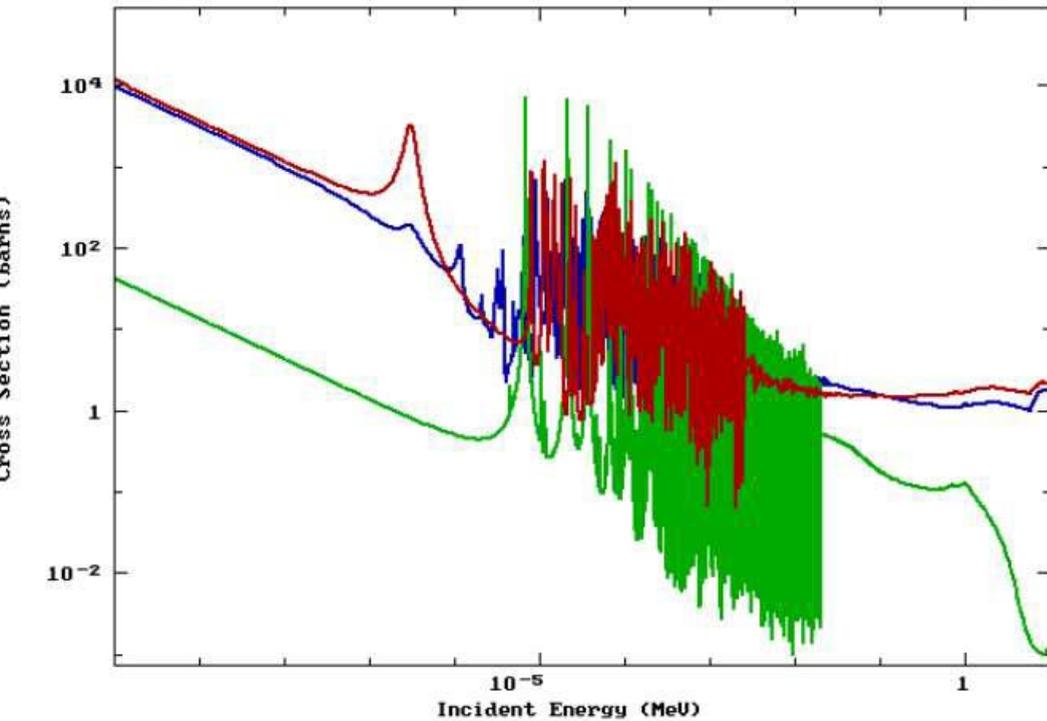
7 Uox usés produisent le plutonium nécessaire pour un assemblage MOx

→ 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*

## 3.1 Recyclage en REP : l'impact des MOX

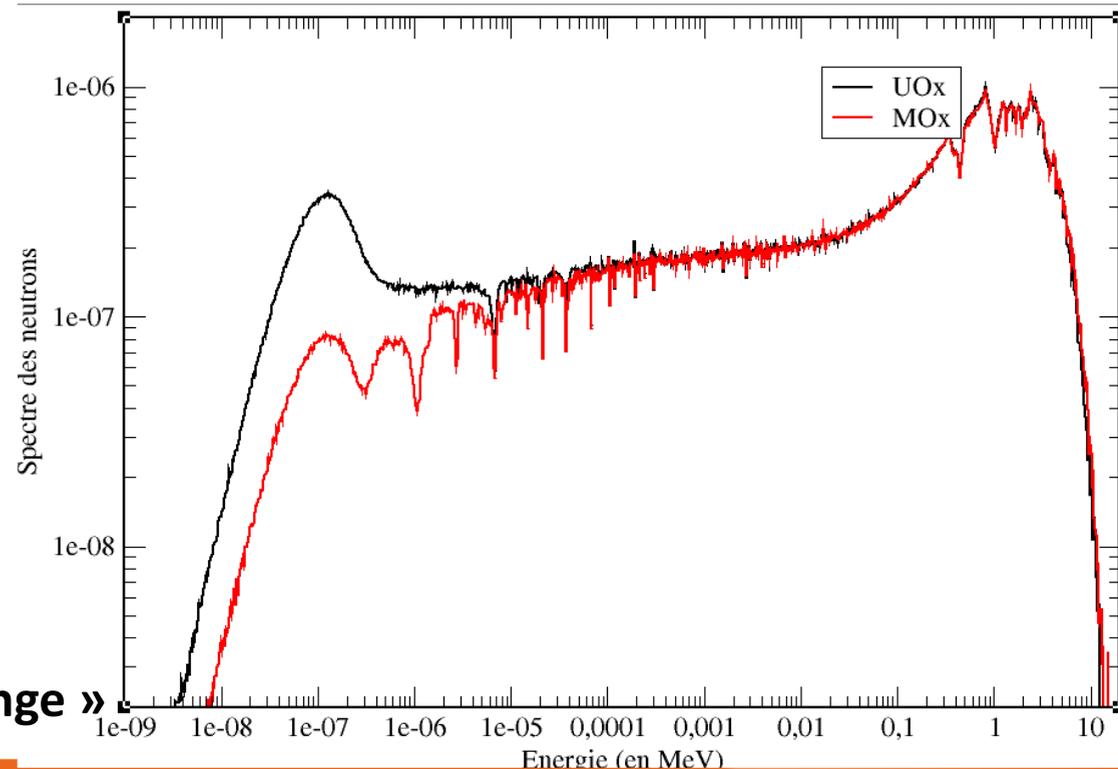


Le spectre se « durcit » (*se déplace vers des énergies plus importante*) et il faut donc enrichir d'avantage

**Les probabilités moyennes de réactions sont très différentes → impact sur le « coefficient de vidange »**

Les isotopes du plutonium ont des résonances importantes :

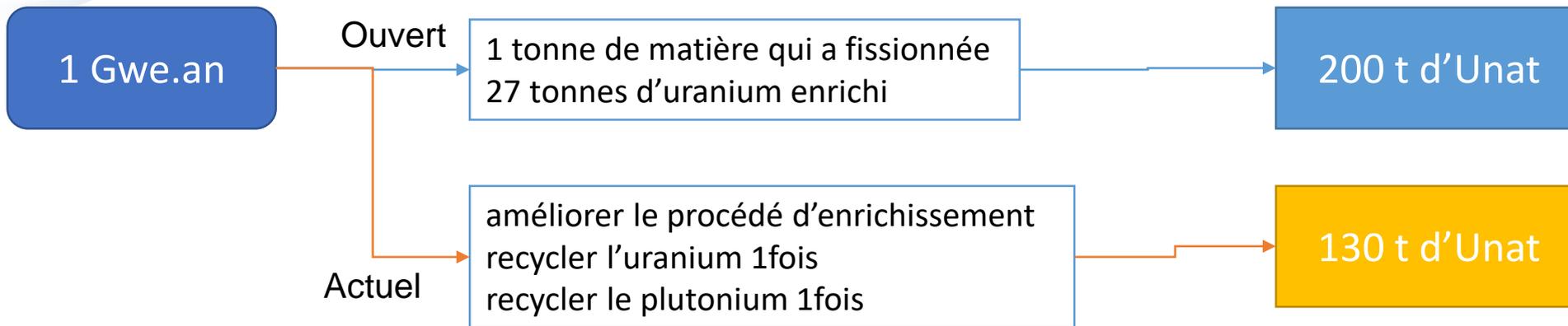
- creusent le spectre neutronique
- Beaucoup de capture => isotopes plus lourds créés



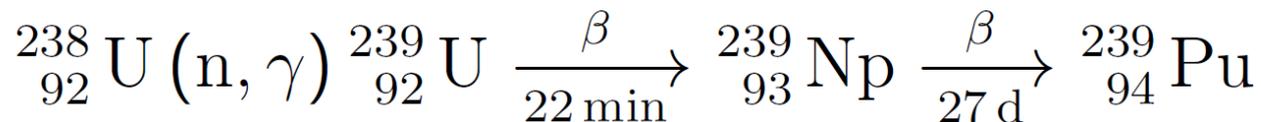


### 3.1 Valorisation du Pu

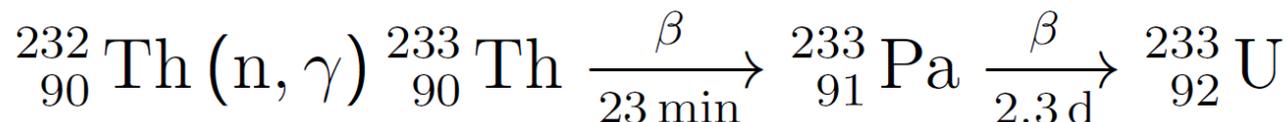
Cycle traditionnel : *Basé sur l'utilisation de l'<sup>235</sup>U (0,7% de l'uranium naturel)*



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)



# 3.1 Régénération

*Bilan neutronique :*

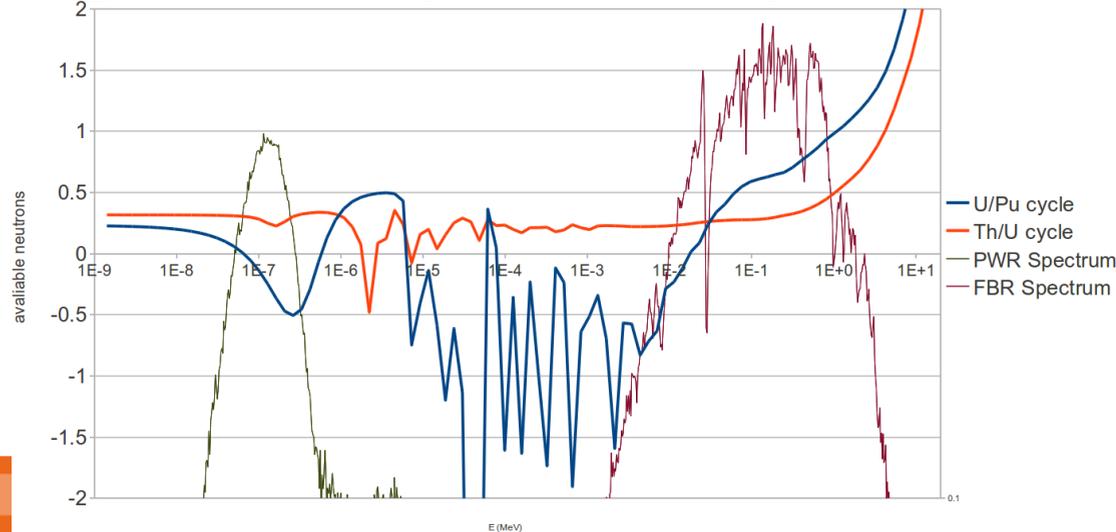
Production de neutrons Par fission	Besoin de neutrons
$\nu$ neutrons produits par fission	1 neutron pour la fission + $\alpha$ neutron pour la capture sur le fissile + 1 + $\alpha$ neutrons sur le fertile

pour la réaction en chaîne

$$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f} \text{ neutrons capturés pour une fission}$$

Il faut produire  $1 + \alpha$  noyau fissile

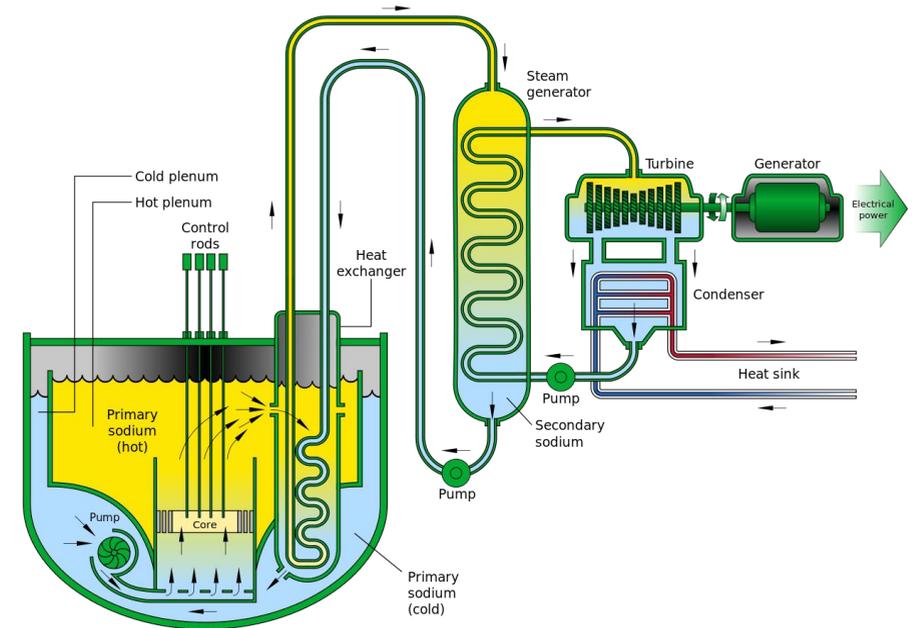
Pour que la régénération soit possible il faut que :  $\nu - 2(1 + \alpha) > 0$



Approximation, donc il faut de la marge



## 3.2 Réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium



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

- Nécessite un échangeur supplémentaire pour les générateurs de vapeurs => augmentation des coût

➤ **Comportement neutronique en cas d'accident différent que dans le cas des REP**

➤ **Refroidissement : Sodium liquide**

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

Grande expérience française + 2 start-ups dans l'APNI : Hexana et Ortrera

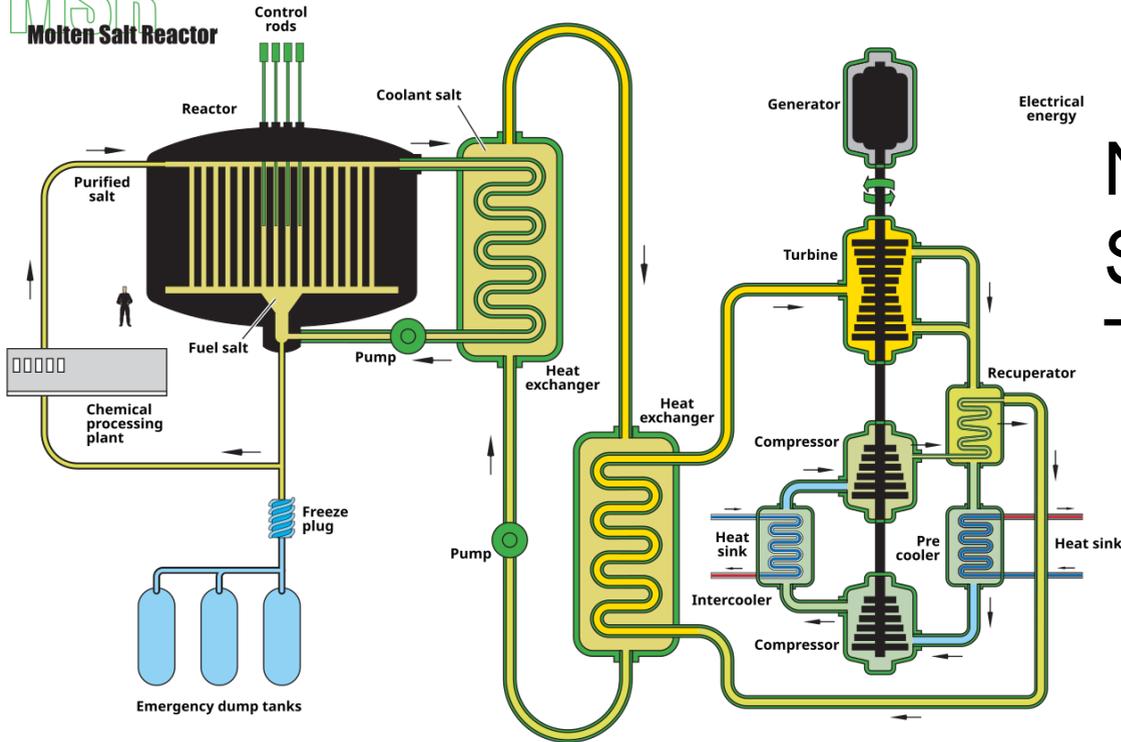


# 3.2 Autre Gen4

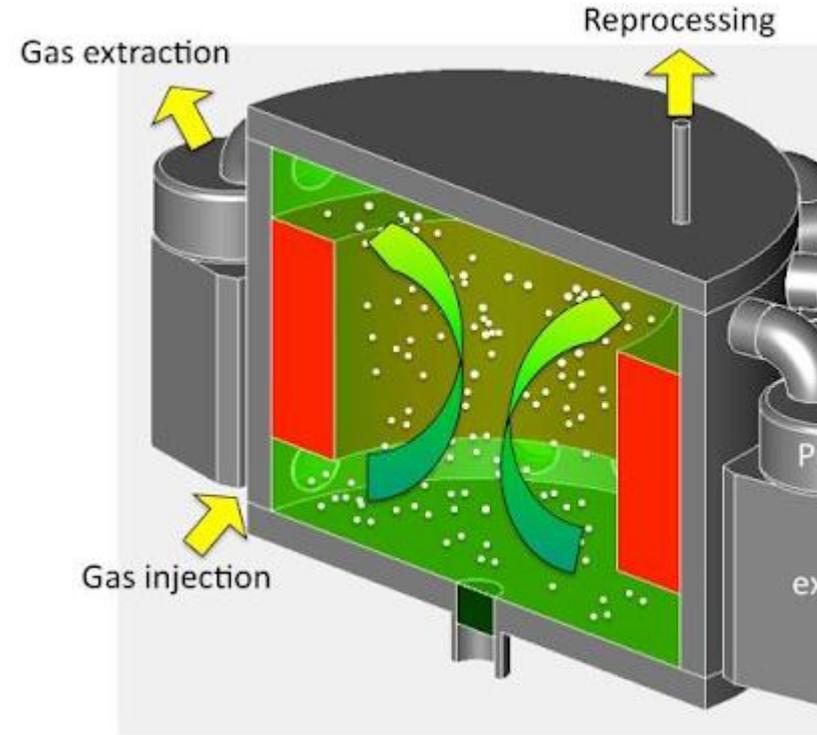
# GEN IV International Forum

Expertise | Collaboration | Excellence

## MSR Molten Salt Reactor



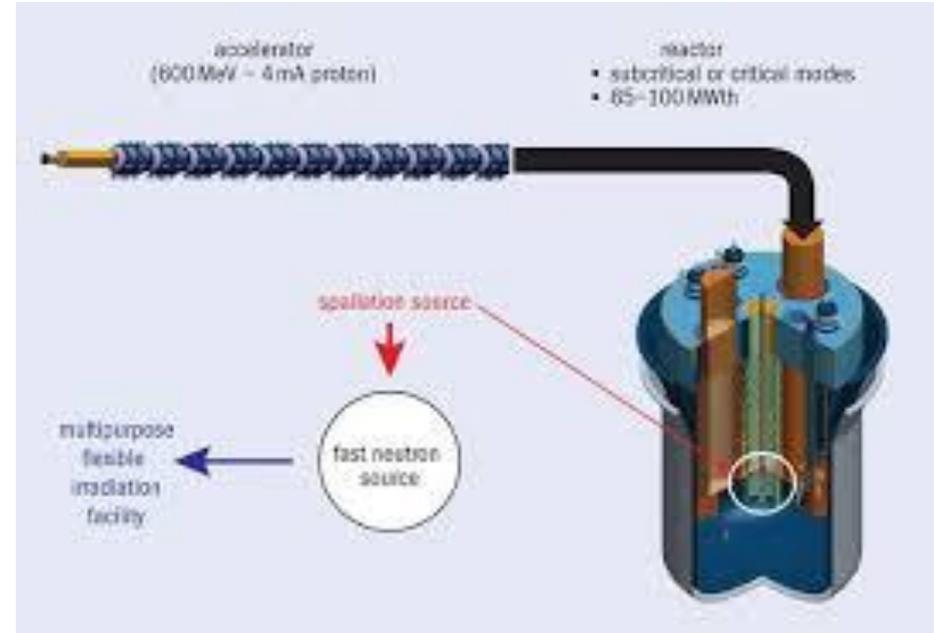
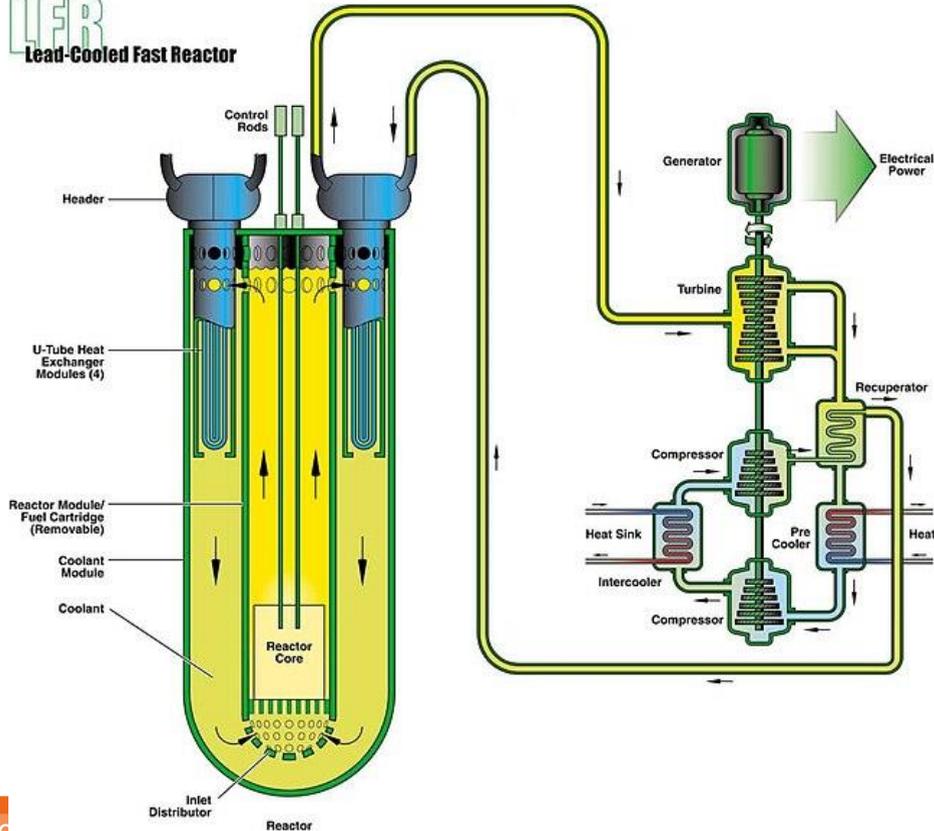
# Naarea Stellaria Thorizon





# 3.2 Autre Gen4

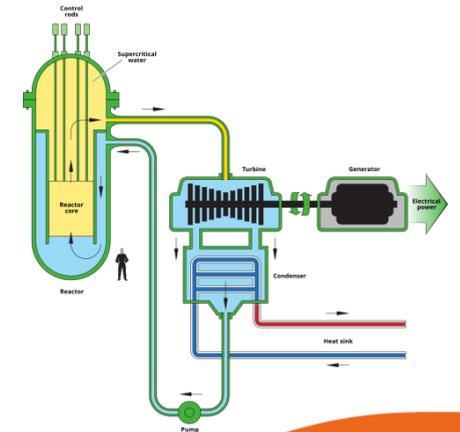
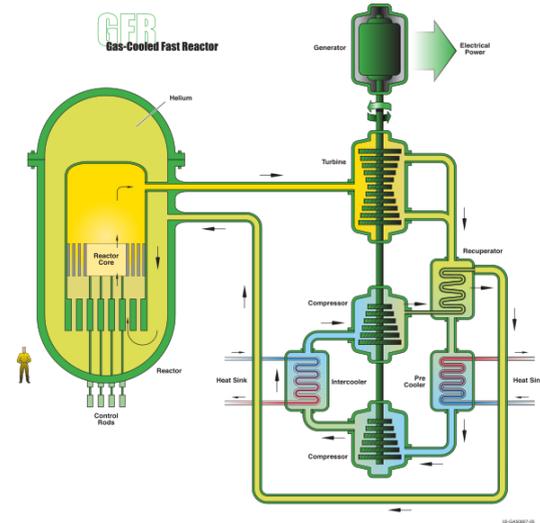
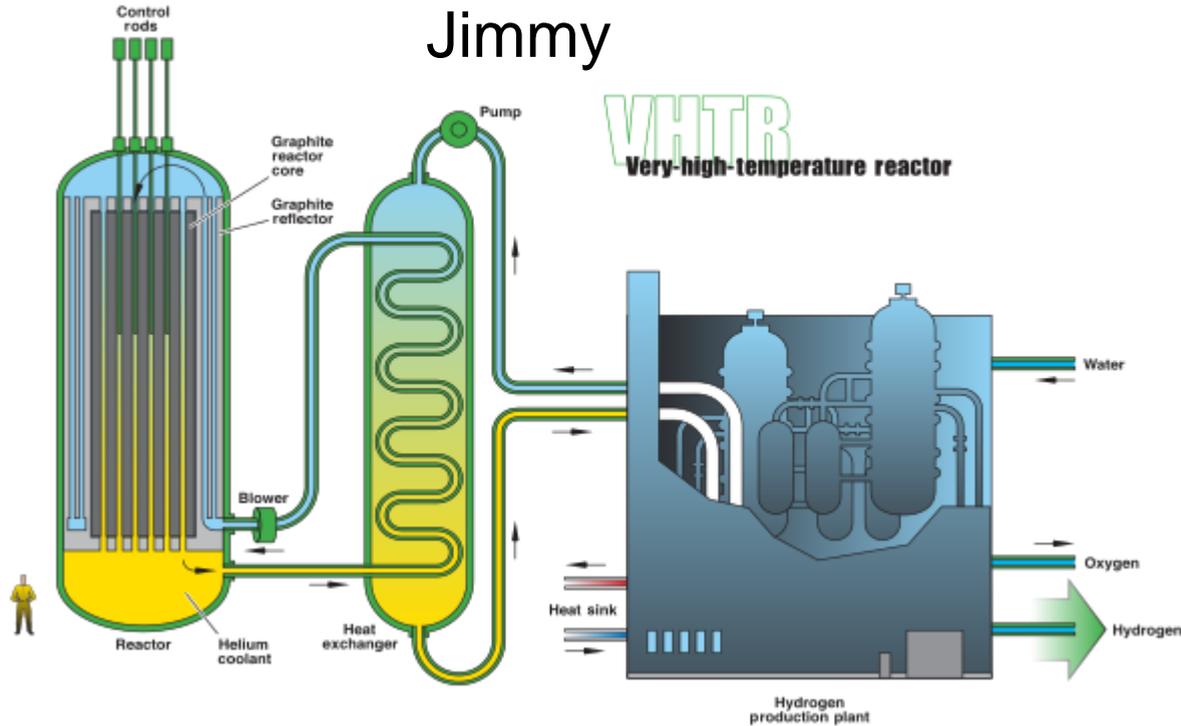
**LEFR**  
Lead-Cooled Fast Reactor



## Newcleo Myrrha (+ADS)



# 3.2 Autre Gen4



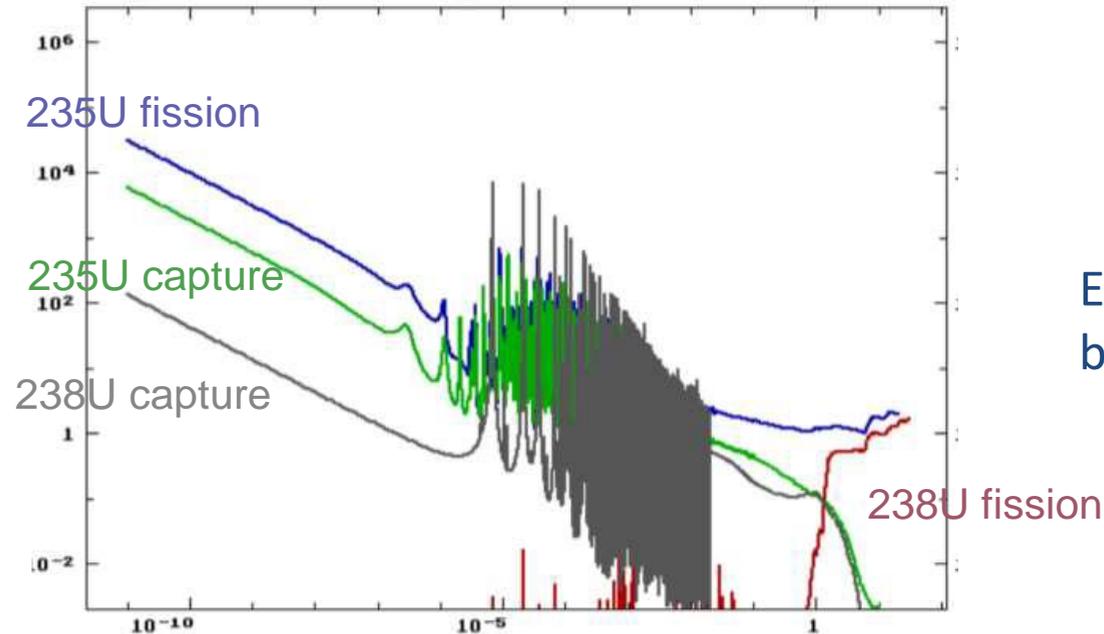


## 3.2 Réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium

Les **réacteurs à neutrons rapides** ont besoin de **plutonium** pour **démarrer**

→ Ensuite ils ne consomment plus que de l'uranium minéral  
*en France on a 200 000 t d'Uapp disponible*

En thermique (REP):  
3% d'enrichissement



En rapide (RNR), on a  
besoin de 10 à 12%

Inventaire initial  
d'un RNR Sodium



12 t  
de Pu

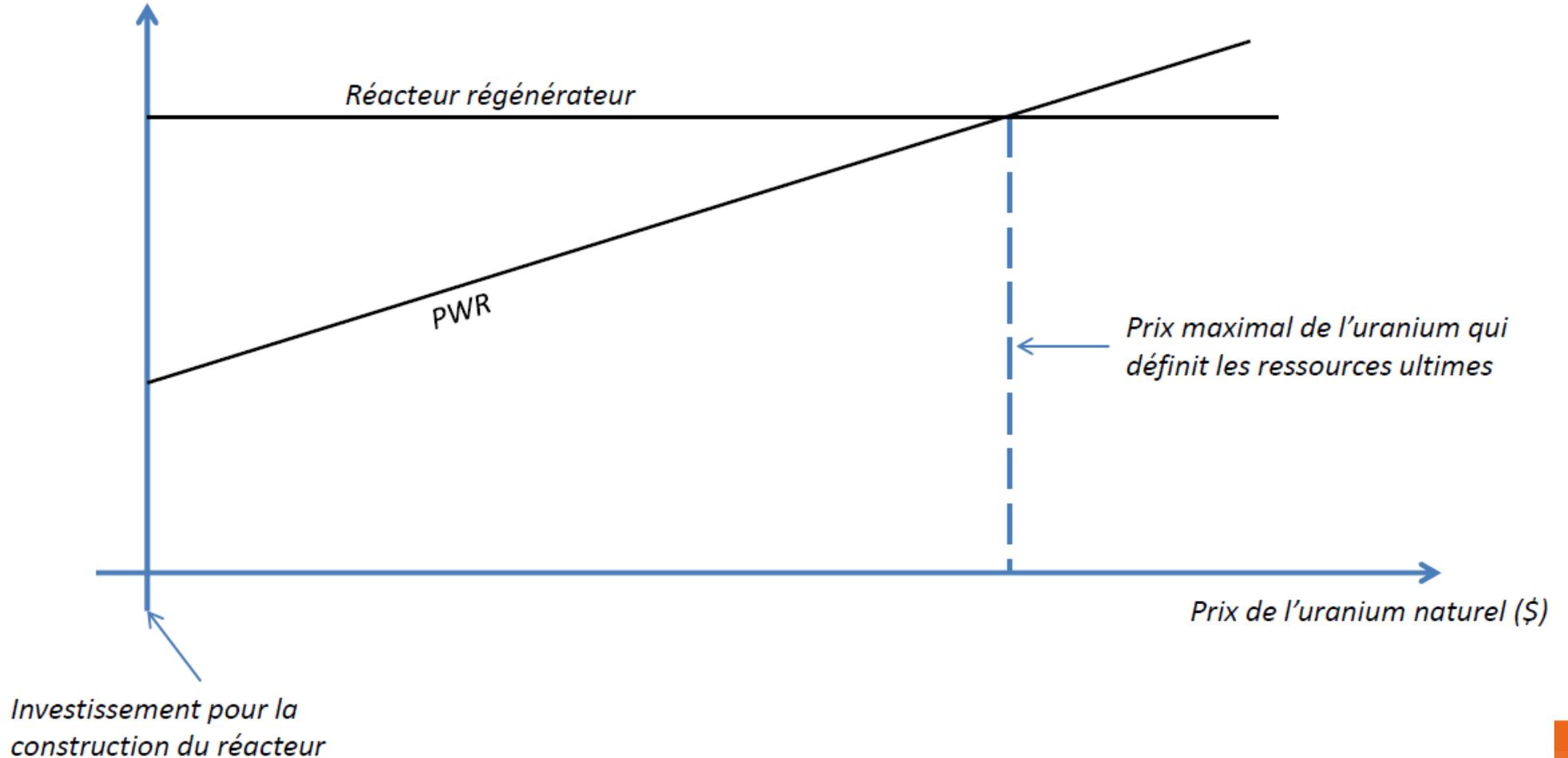


Un REP produit  
en 50 ans



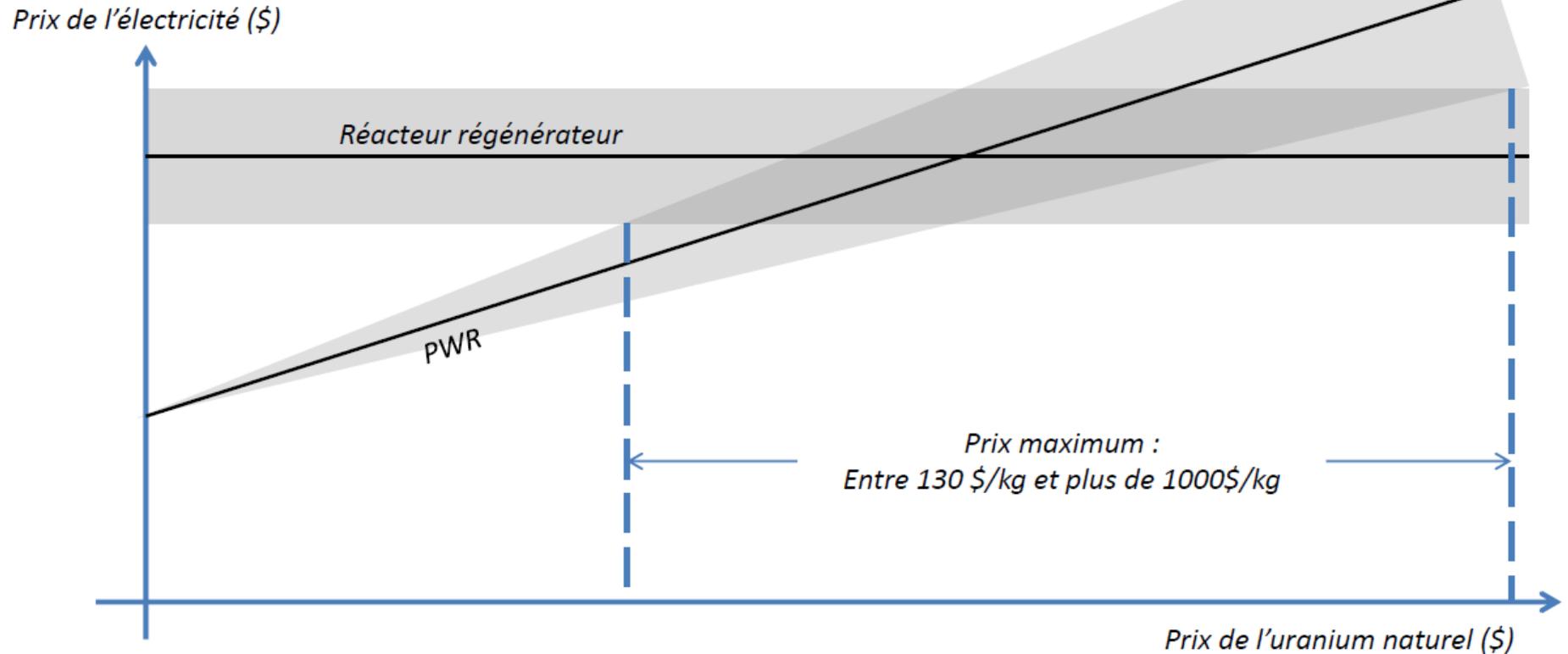
## 3.2 Réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium

Prix de l'électricité (\$)





## 3.2 Réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium



Aujourd'hui : 285 GWe (équivalent pleine puissance)

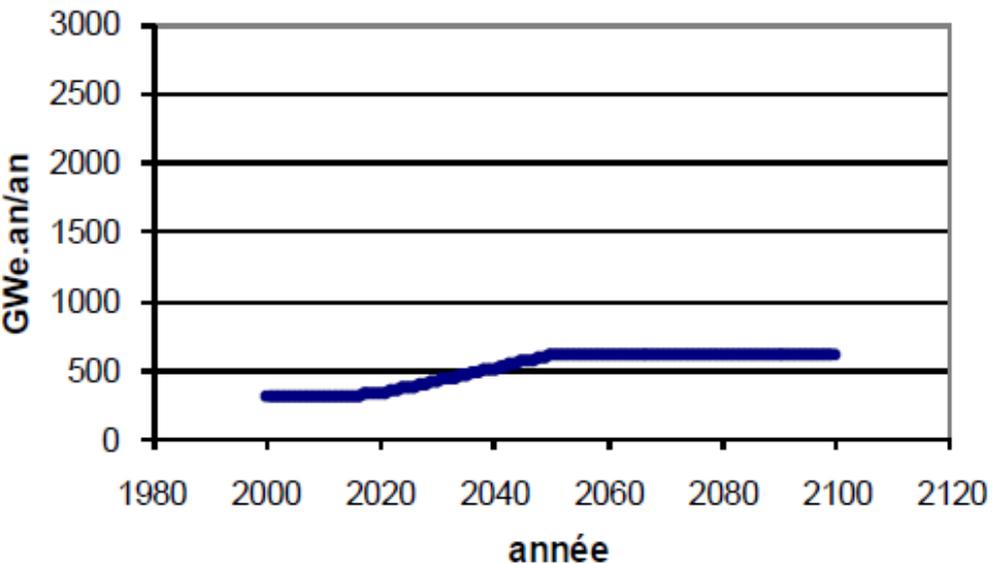
→ 60 000 tonnes d'uranium naturel consommé par an

Les ressources estimées se situent entre 10 – 23 millions de tonnes



## 3.2 Recyclage et ressources en uranium naturel

### Demande nucléaire



Aujourd'hui:

- 45 000 tonnes d'Unat /an

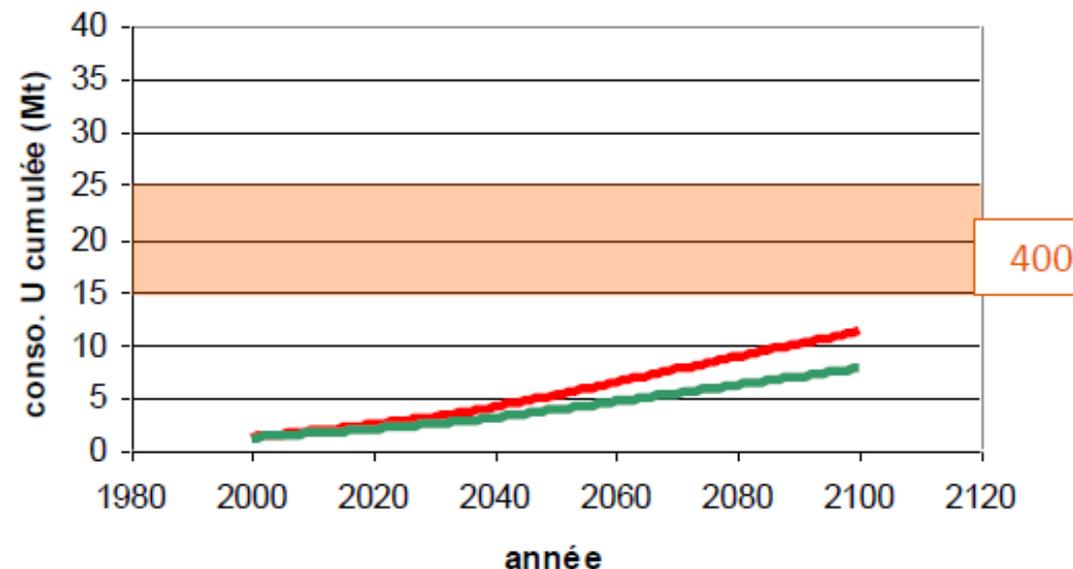
- Cigar lake :

→ ouverture prévue en 2007

→ ouverture réelle en 2014

→ Production nominale de 10 900 t/an

### Utilisation cumulé des ressources

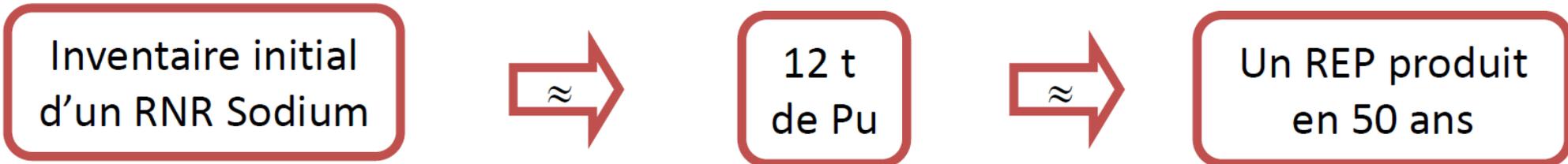


— 200t/(GWe.an)

— 130t/(GWe.an)



## 3.2 Recyclage et ressources en uranium naturel



*Cas Français (parc de 60 GWe de RNR-Na) : scénarios CEA-EDF ≈ 1200 tonnes de Pu*

La situation en **2025** :

**370 tonnes de Pu «disponible»** soit 37% seulement de l'inventaire d'un parc RNR

Si on a besoin rapidement des RNR (avant 2100) et massivement, il faut économiser le plutonium

**L'incertitude est forte sur le long terme mais  
il est nécessaire d'anticiper très en amont**

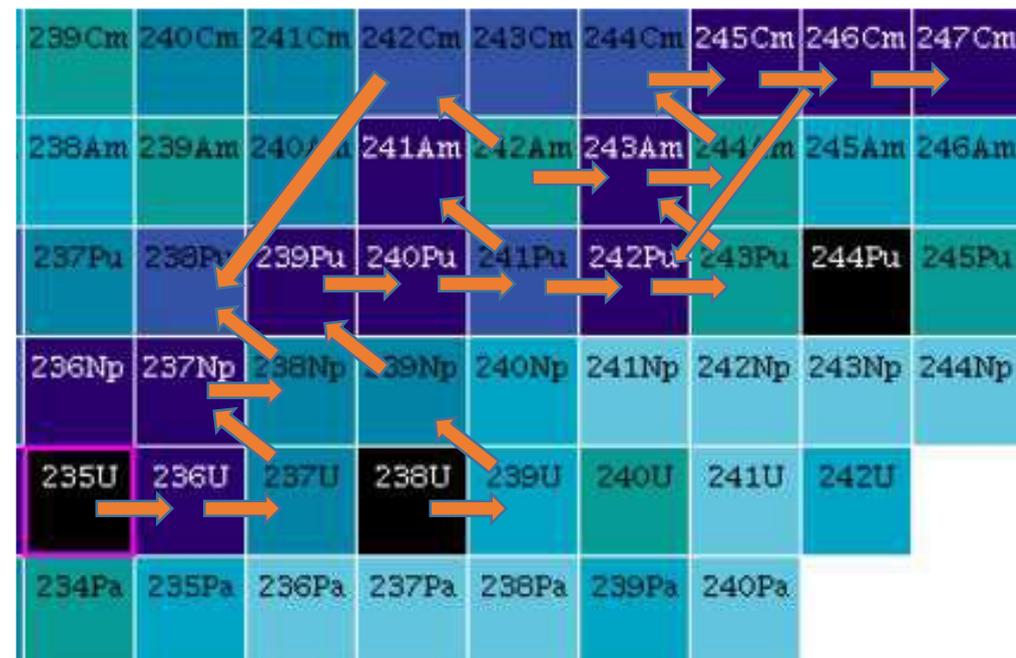
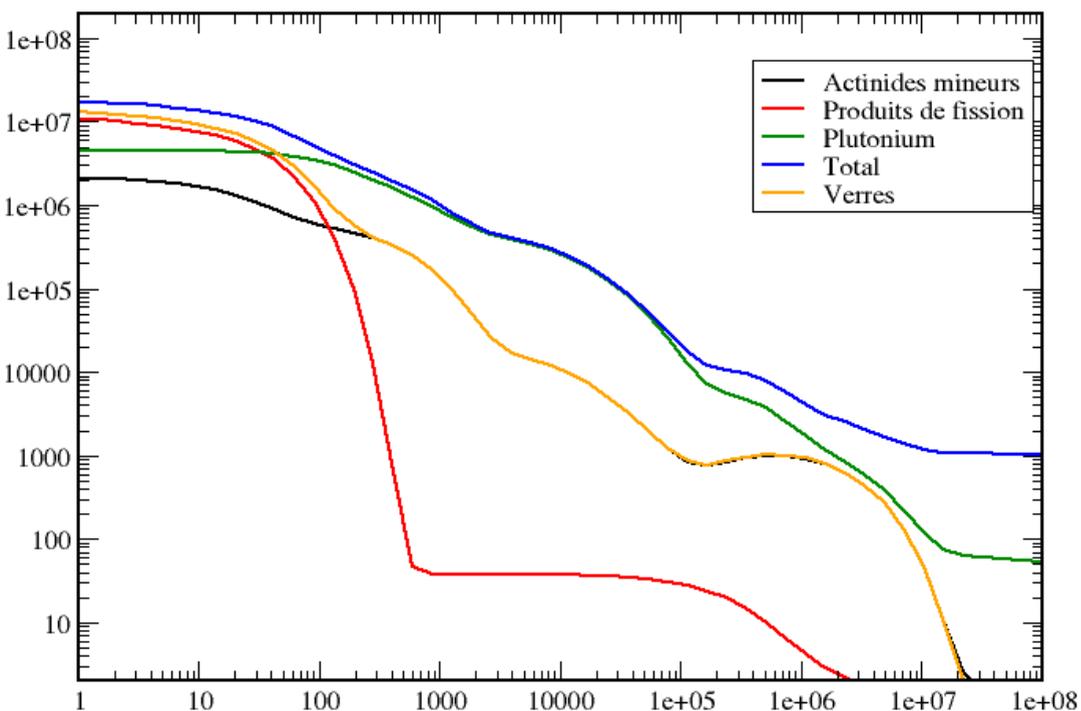
Le recyclage permet de concentrer le Pu dans les Mox usés, en vue de faciliter le recyclage plus tard :

→ **8 fois moins d'assemblages à recycler pour lancer 1 RNR.**

→ *Maintien des compétences industrielles*



## 4.1 La transmutation qu'est-ce que c'est?

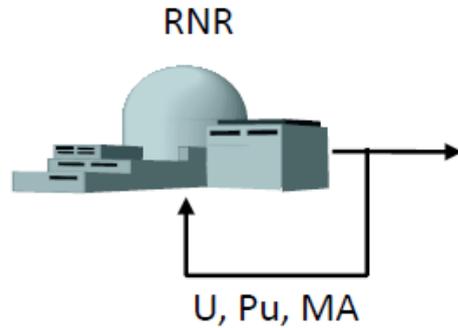


**Une fois le Pu géré**, majorité de la difficulté de gestion des déchets provient de quelques isotopes de quelques éléments lourds issus de captures successives :  
Transmutation : les amener jusqu'à la fission

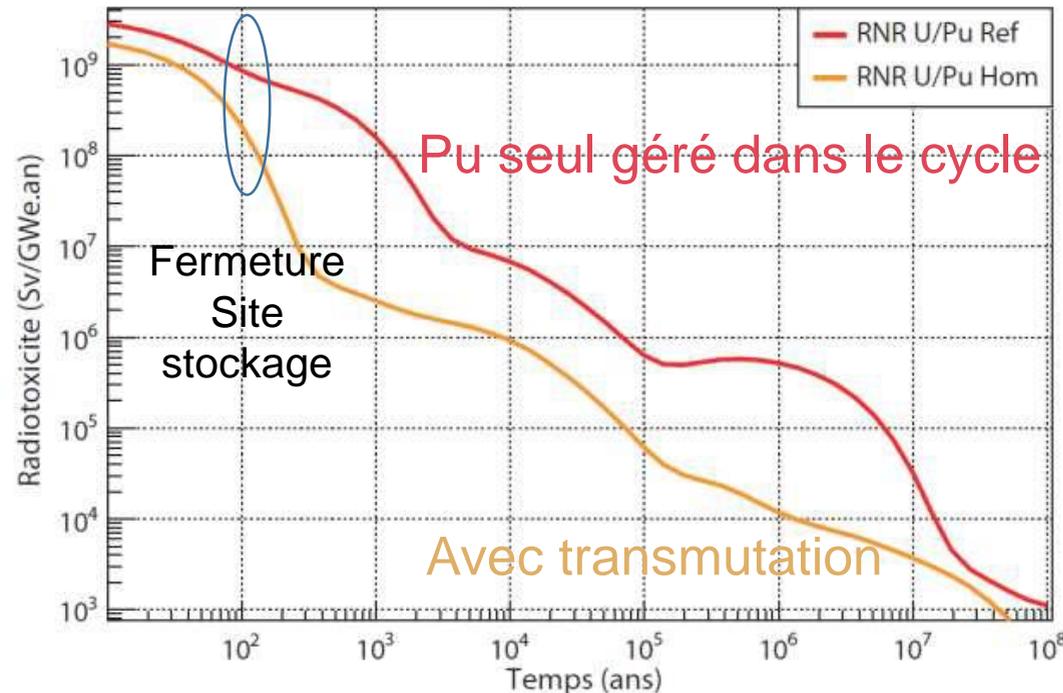
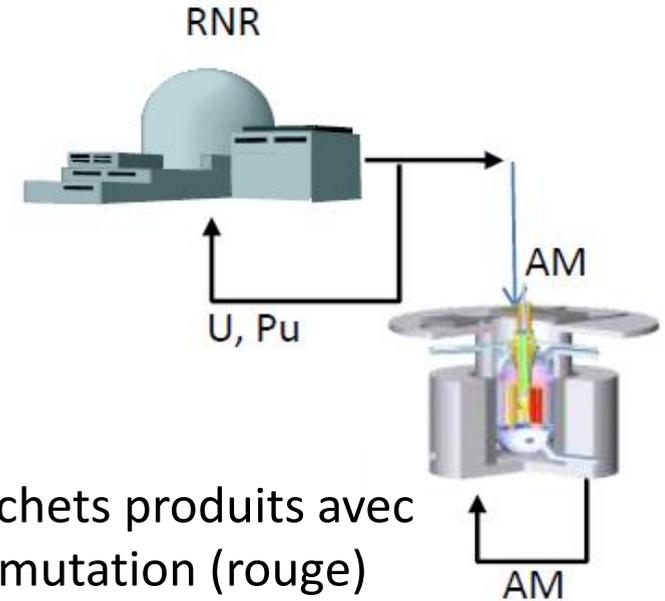


## 4.1 La transmutation : Possibilités techniques

Gérer Pu et AM ensemble



Strate dédiée

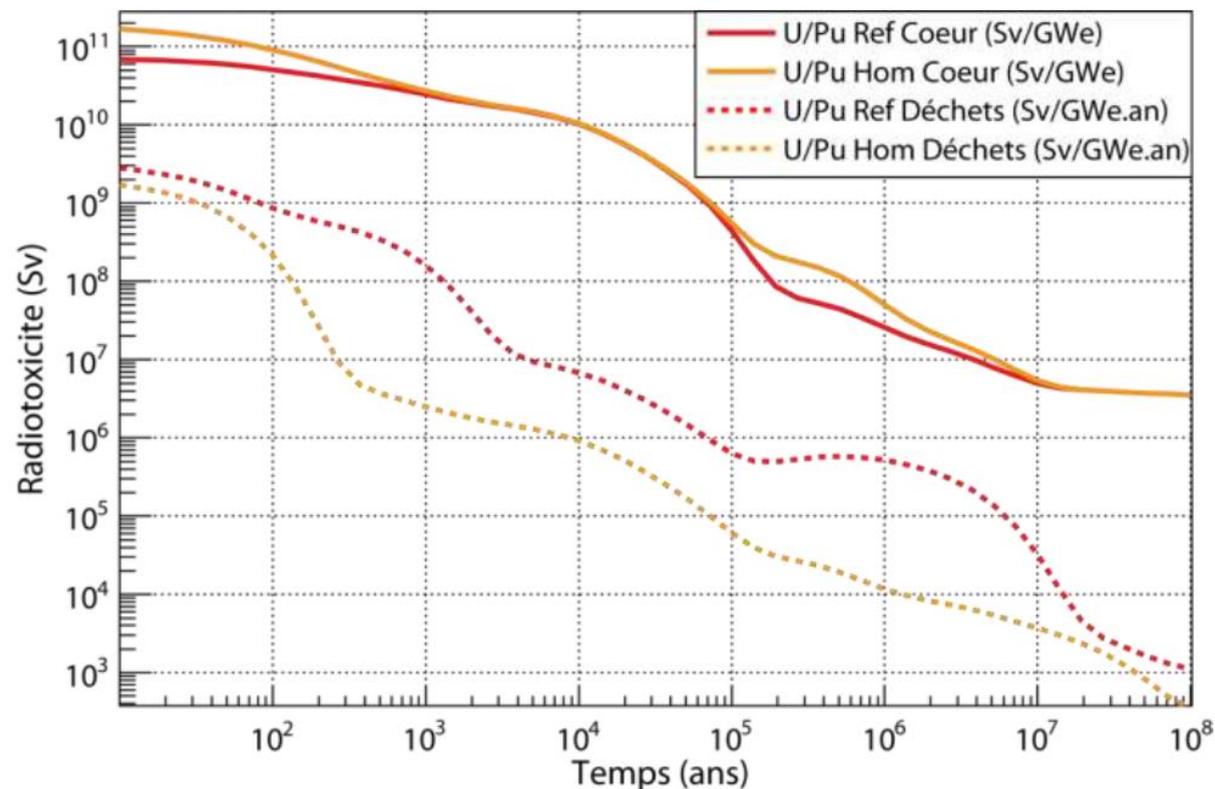


Comparaison des déchets produits avec (jaune) et sans transmutation (rouge)

- 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



## 4.1 La transmutation : Possibilités techniques



***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 » sont très impactés par nos choix technologiques



## 4.1 La transmutation : impact sur le stockage requis

**Transmutation implique usage de réacteurs très innovants.**

Avec seulement **Pu+AM** : apport limité :

- on gagne un facteur 5 sur l'emprise du stockage HA-VL, moyennant un entreposage de 50 ans supplémentaire
- **Il faut toujours un stockage de plusieurs 100ans**

**Pour passer la barre des 100ans, il faut aller (bcp) plus loin** en séparant les Césiums et Strontium (30 ans de période)

→ Ouvre la possibilité de redéfinir le cahier des charges de la gestion de l'aval du cycle en l'associant à l'entreposage

Pour avoir un vrai impact la transmutation a encore besoin de temps et de moyens



## 4.1 La transmutation : Possibilités techniques

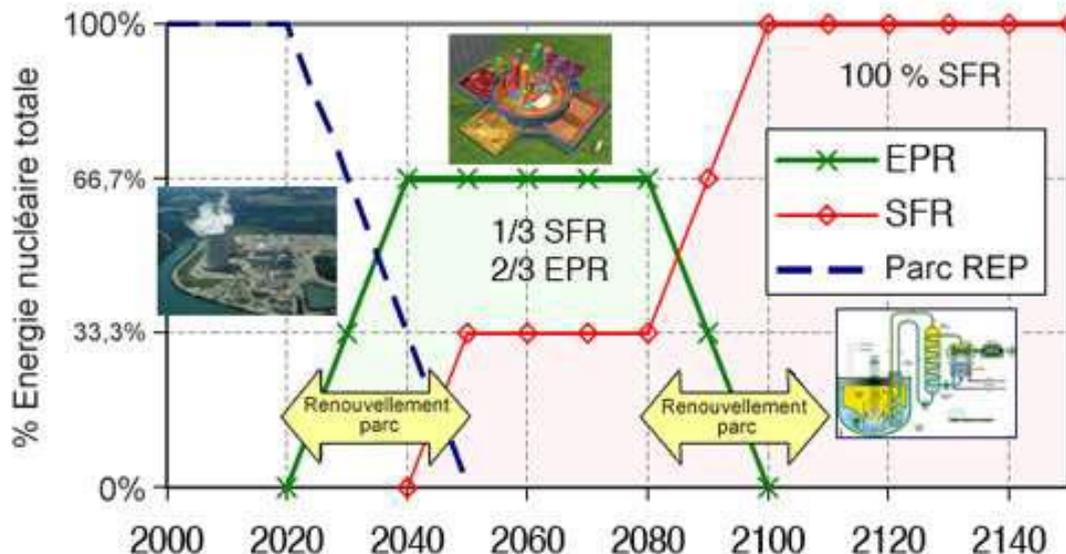
	Confiance dans la société	Oui	Non
Promoteur-nucléaire	Pour un développement durable du nucléaire	X	
	Pour la transmutation		X
« Anti-nucléaire »	Pour un développement durable du nucléaire		X
	Pour la transmutation et/ou entroposage	X	

Un choix vraiment compliqué



## 5 Conclusions : quel nucléaire pour quel futur ?

Comment choisir ? Evaluer l'impact d'un choix sur l'ensemble de la stratégie : scénarios



### Variantes :

- Date de déploiement des RNR
- Transfert du plutonium aux frontières
- Mises en place de la transmutation
- **Cycle du thorium**
- **Réacteurs alternatifs (RSF, ADS, ...)**

### Différents critères de comparaison

- *Production de déchets*
- *Consommation de la ressource naturelle*
- *Coefficients de sûreté de base*
- *Inventaire en cycle*
- *Résistance à la prolifération*



## 5 Conclusions : Importance de la temporalité

- Démarrer une nouvelle installation :
  - 10 ans : délai entre décision et effet
- Pour évaluer une stratégie il faut aller jusqu'à la fin de vie des installations :
  - 60 /80 ans
- Le contexte change vite
  - contraintes CO2, prix de l'énergie, accidents nucléaires ...
- Les décisions politiques changent encore plus vite
  - 2018 vs 2021 : arrêt du démonstrateur de RNR vs +6 EPRs & SMRs

### **Besoin de stratégies « flexibles » :**

- **Démarrer** les RNR dès 2050 si besoin
- **Stabiliser** le Pu « en attente » si besoin
- **Incinerer** le Pu accumulé dans le parc si besoin



## 5 Conclusions : Importance de la temporalité

- Démarrer une nouvelle installation :
  - 10 ans : délai entre décision et effet
- Pour évaluer une stratégie il faut aller jusqu'à la fin de vie des installations :
  - 60 /80 ans
- Le contexte change vite
  - contraintes CO2, prix de l'énergie, accidents nucléaires ...
- Les décisions politiques changent encore plus vite
  - 2018 vs 2021 : arrêt du démonstrateur de RNR vs +6 EPRs & SMRs

### **Besoin de stratégies « flexibles » :**

- **Démarrer** les RNR dès 2050 si besoin
- **Stabiliser** le Pu « en attente » si besoin
- **Incinerer** le Pu accumulé dans le parc si besoin



## 5 Conclusions : Importance de la temporalité

Pour étudier la flexibilités des stratégie, on peut se reposer sur nos outils de modélisations : simuler une version simplifiés du cycle actuel et des strategies envisages pour les comparer et les soumettre à des disruptions

**Si on choisi aujourd'hui une stratégie basée sur le déploiement de RNR, est-ce que ce choix est encore pertinent si le contexte change en cours de route?**

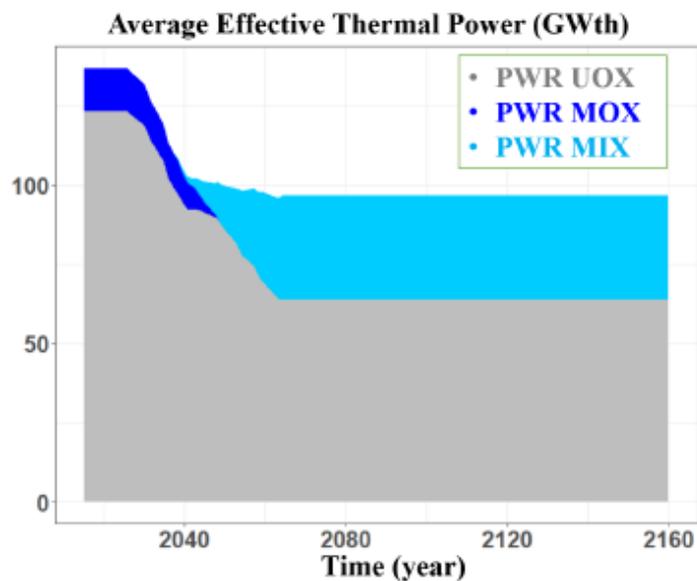
**Comment adapter notre choix pour rester flexible?**

**A quell point les simplifications faites impactent le choix de cycle pertinent?**

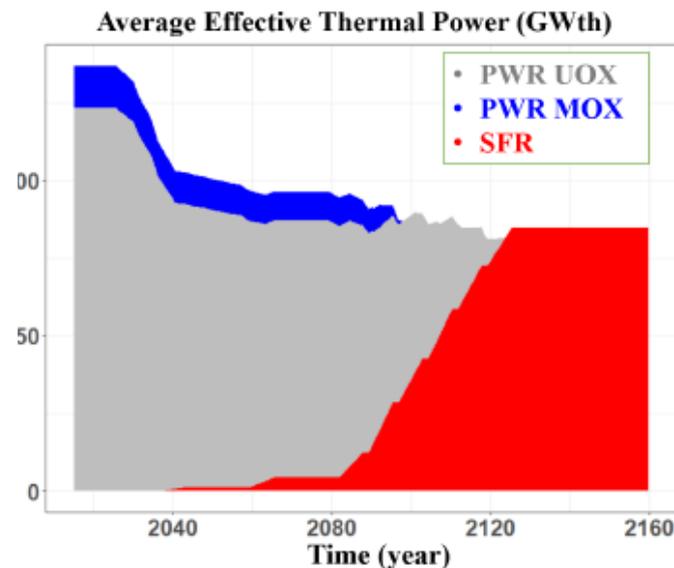


## 5 Etudes de cycle exemple d'étude

- Est-ce que le multi-recycle de Pu en REP est un obstacle au déploiement des RNR ?



Vs

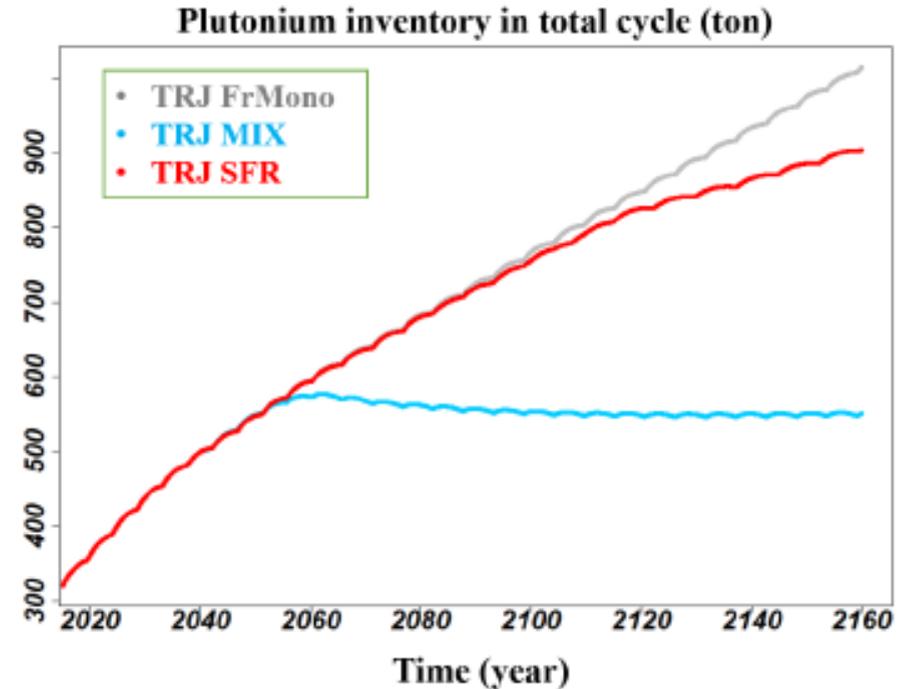
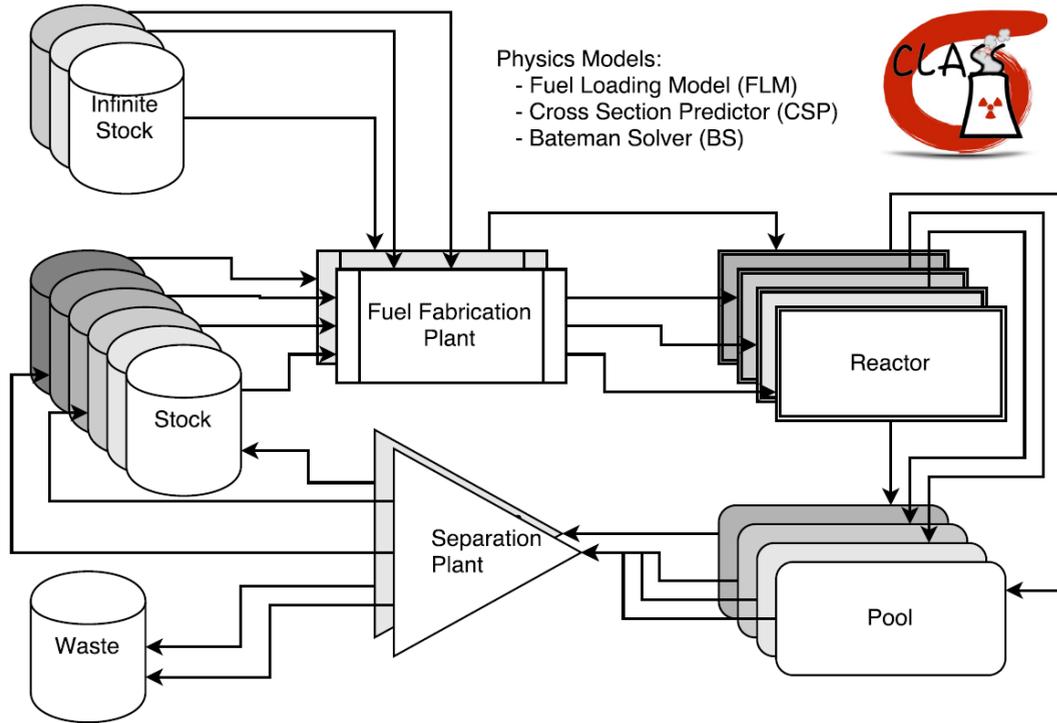


Exploration via des échantillonnage et des expériences numériques sur CCIN2P3



## 5 Etudes de cycle exemple d'étude

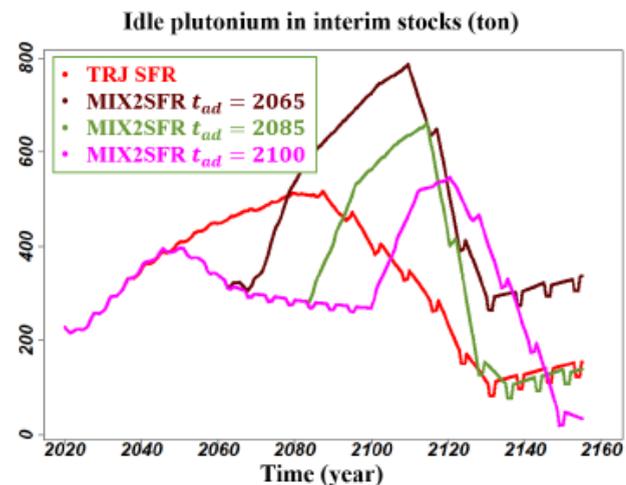
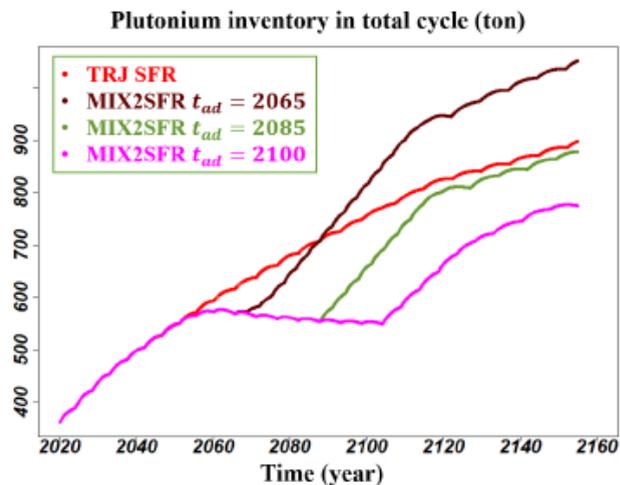
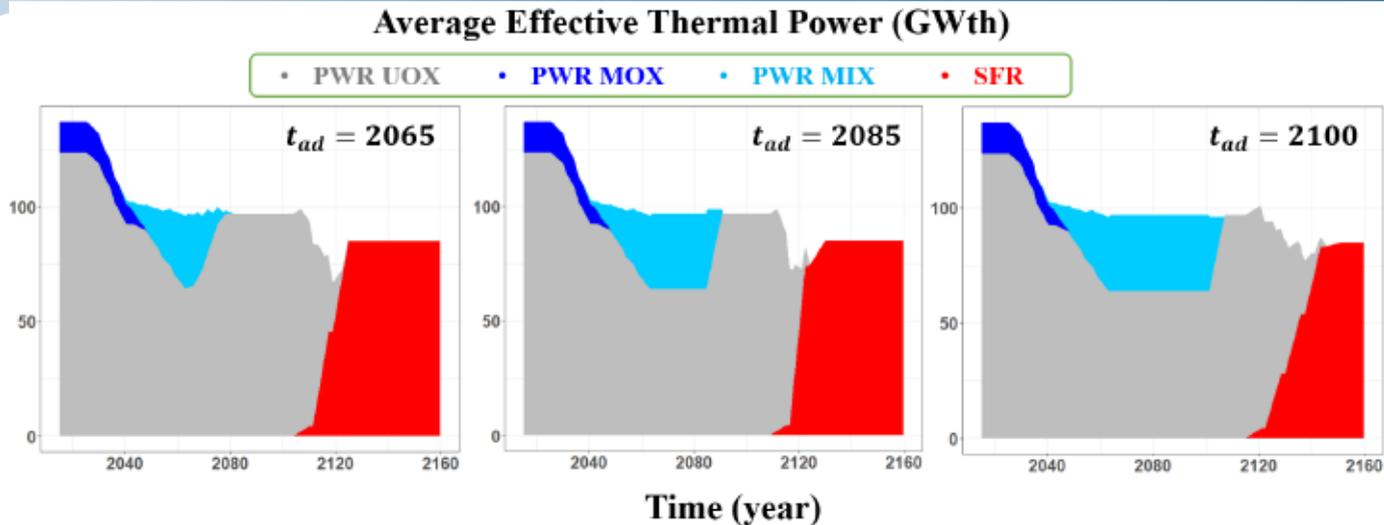
- Est-ce que le multi-recycle de Pu en REP est un obstacle au déploiement des RNR ?



Exploration via des échantillonnage et des expériences numériques sur CCIN2P3

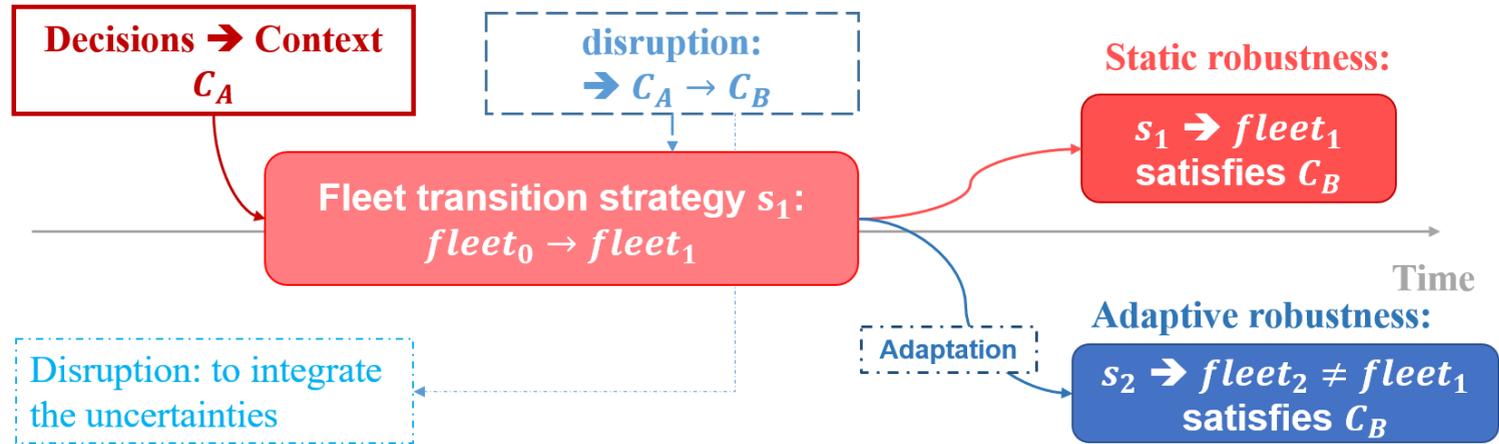


# 5 Conclusions : Importance de la temporalité : Exemple





## 5 Conclusions : Importance de la temporalité : Exemple



### Robustesse

- Si on choisit aujourd'hui une stratégie basée sur le déploiement de RNR, est-ce que ce choix est encore pertinent si le contexte change en cours de route?
- Comment adapter notre choix pour rester flexible?

Compétition entre précaution et adaptation : enjeux de physiques et de modélisations différents

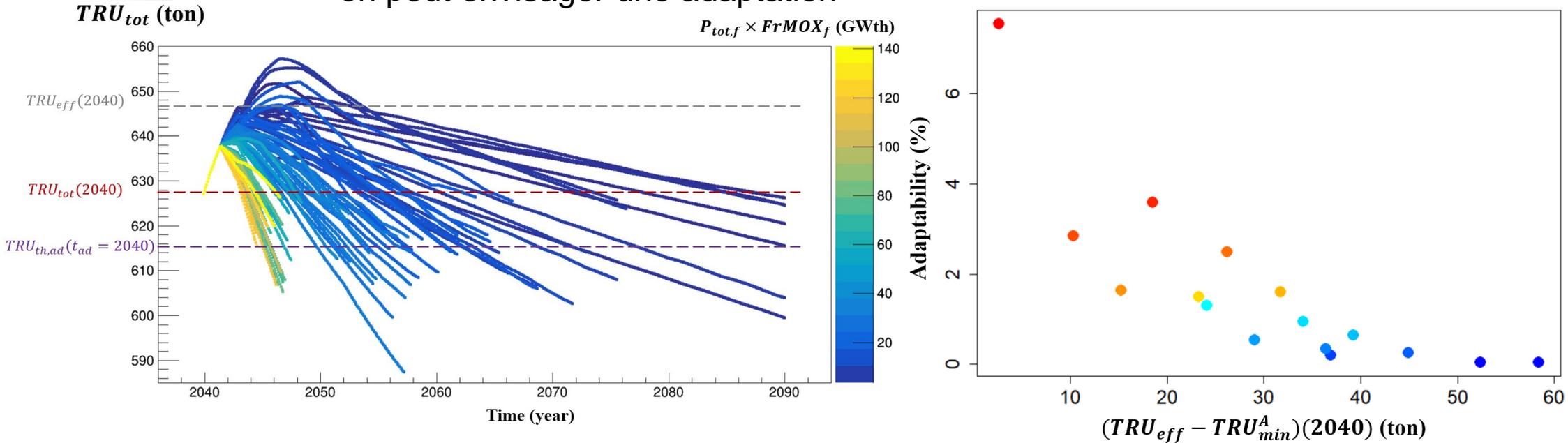
- précaution => réduire les biais et erreurs, quantification des contraintes de faisabilité
- Adaptation => modèle rapide, prise en compte de l'inertie des systèmes

Quelles interactions avec les incertitudes standards?



## 5 Conclusions : Importance de la temporalité : Exemple

Si la disruption est perçue suffisamment à l'avance et que la filière est réactive, on peut envisager une adaptation



- Différentes stratégies peuvent être plus ou moins difficiles à adapter
- Adaptability : % des adaptation qui conduisent à des stratégies acceptables



## 5.5 Conclusions : Conclusion

### ***Historiquement (en 1991) Le CNRS/IN2P3***

*s'implique dans la thématique via les sciences fondamentales*

- *Spallation et physique nucléaire*

*Changement de paradigme : les applications alimentent la physique fondamentale*

### ***Actuellement IN2P3 =***

- *Expertise en détection*
- *Expertise en physique nucléaire (expérimentale et théorie)*
- *Expertise en simulation (Monte-Carlo + Machine learning + Big data)*
- *Expertise en physique des matériaux dans des conditions extrêmes*
- *Positionnement unique « académique » sur cette problématique (sphère publique)*
- *Séparé de l'industrie*
- *neutralité possible et entendable par le public*

### ***Réponse limité disciplinairement***

*(on n'a pas parlé des matériaux, du retraitement, de la sûreté,...)*

- *Nécessité de l'interdisciplinarité (Sciences de l'énergie, économie, sociologie,...)*
- *Le CNRS et les Universités sont un bon cadre*