

# Energie(s) nucléaire(s) du futur

–

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

Xavier Doligez, IJC-lab Orsay (CNRS)

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

**Promotion Enrico Fermi & David Hilbert**

*1<sup>er</sup> - 11 juillet 2024*

# Introduction - Le génie nucléaire : une « discipline » issue de la physique nucléaire ?

Pourquoi un exposé sur l'énergie nucléaire dans ces rencontres ?

- Y-a-t-il besoin d'une telle introduction pour une promotion Enrico Fermi ?
  - Retour sur la discussion de mercredi en une date : **2 décembre 1942 : première divergence de CP-1**

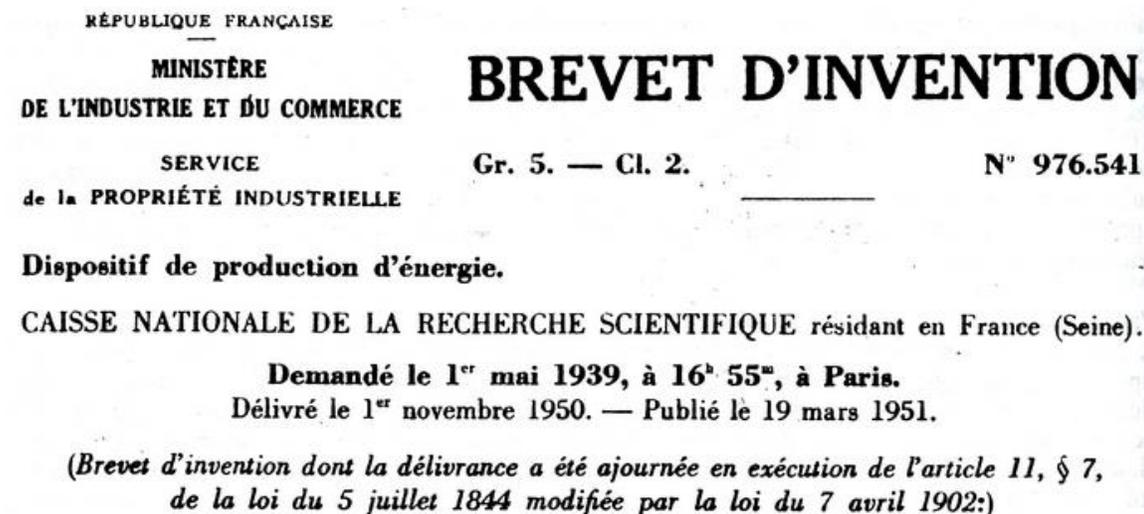


# Introduction - Le génie nucléaire : une « discipline » issue de la physique nucléaire ?

Pourquoi un exposé sur l'énergie nucléaire dans ces rencontres ?

- Université Paris - Saclay : un lieu chargé d'histoire pour parler d'énergie :
  - Site d'Orsay :
    - 1956 : Irène et Frédéric Joliot (« inventeur » de la réaction en chaîne de fission) fondent l'IPNO
  - 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
  - 1997 : Arrêt et démantèlement du réacteur Super Phénix (réacteur sur-générateur)
- 2022 : Un tournant dans l'histoire du nucléaire : vers un nouveau plan Messmer ?
- 2024 : Dissolution... et maintenant ?



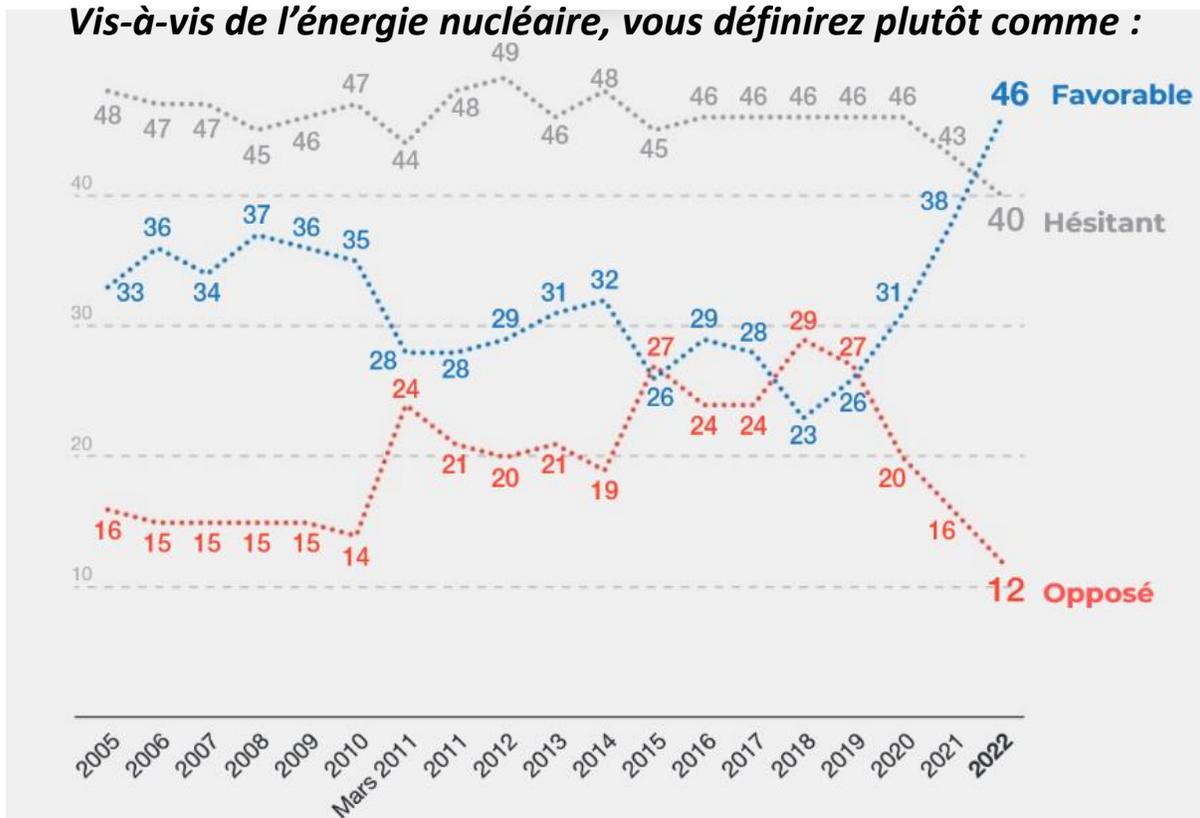
# Introduction - Le génie nucléaire : une « discipline » issue de la physique nucléaire ?

Une problématique technique, sociale, politique...

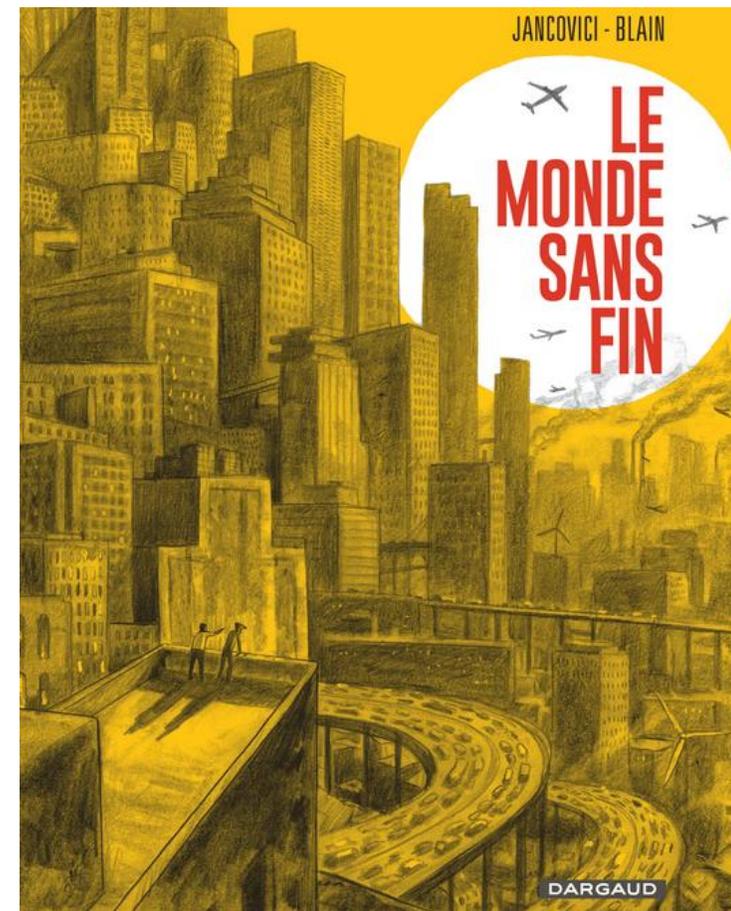
➤ Une évolution pas toujours très compréhensible...

## Baromètre ASN :

Vis-à-vis de l'énergie nucléaire, vous définirez plutôt comme :



➤ Un effet « Janco » ?



➤ Une volonté politique ?



→ Réduction de ~75% à 50% de la production électrique d'ici 2035

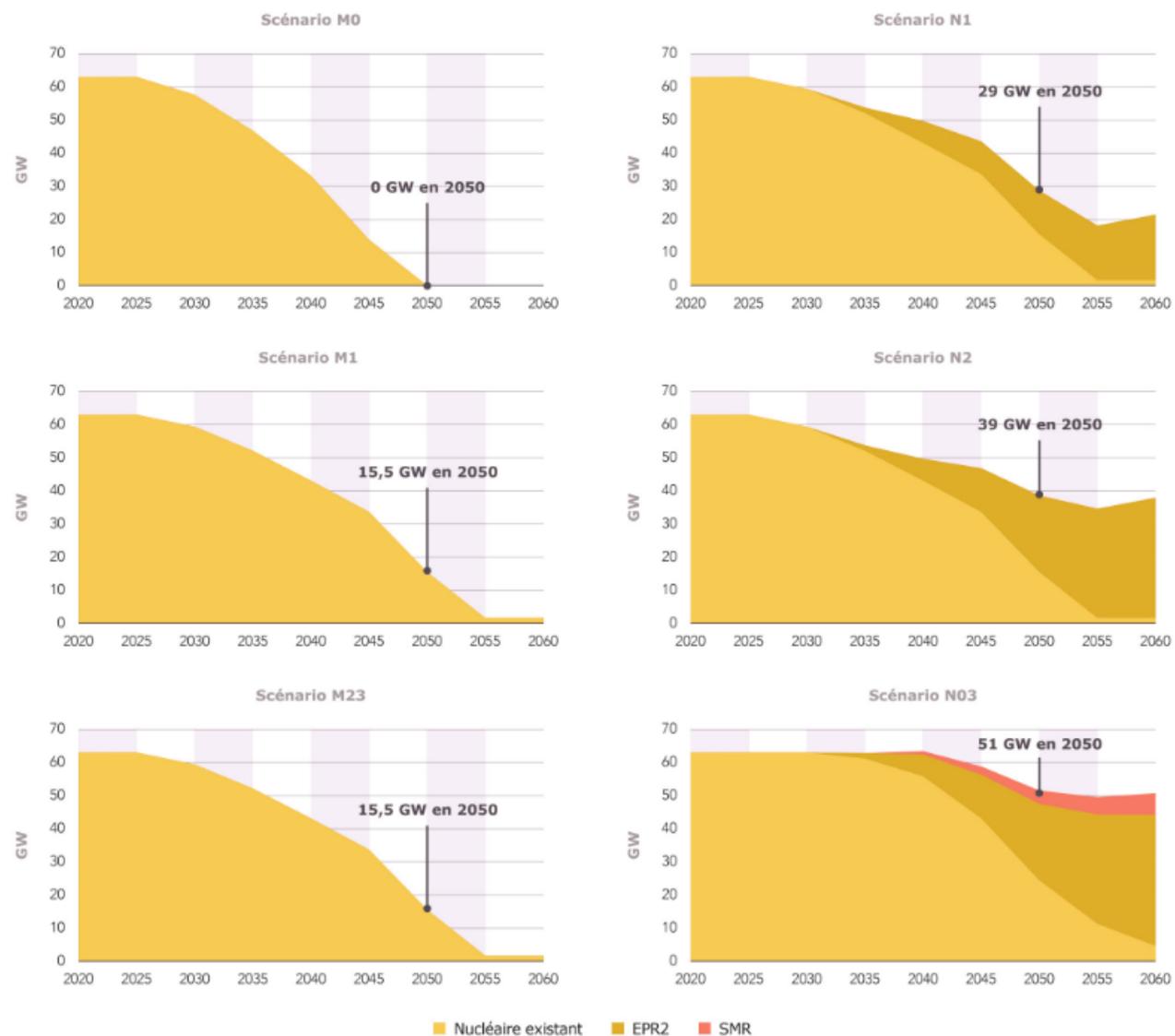
→ Fermeture de 14 réacteurs...

→ Mais construction de 3 paires d'EPR2...

# Introduction - Le génie nucléaire : une « discipline » issue de la physique nucléaire ?

Une problématique technique, sociale, politique...

- **10 février 2022** : discours de Belfort et affichage politique d'une « relance » du nucléaire  
 → Basé sur les travaux de prospectives RTE « Futurs énergétiques 2050 » (10/2021)



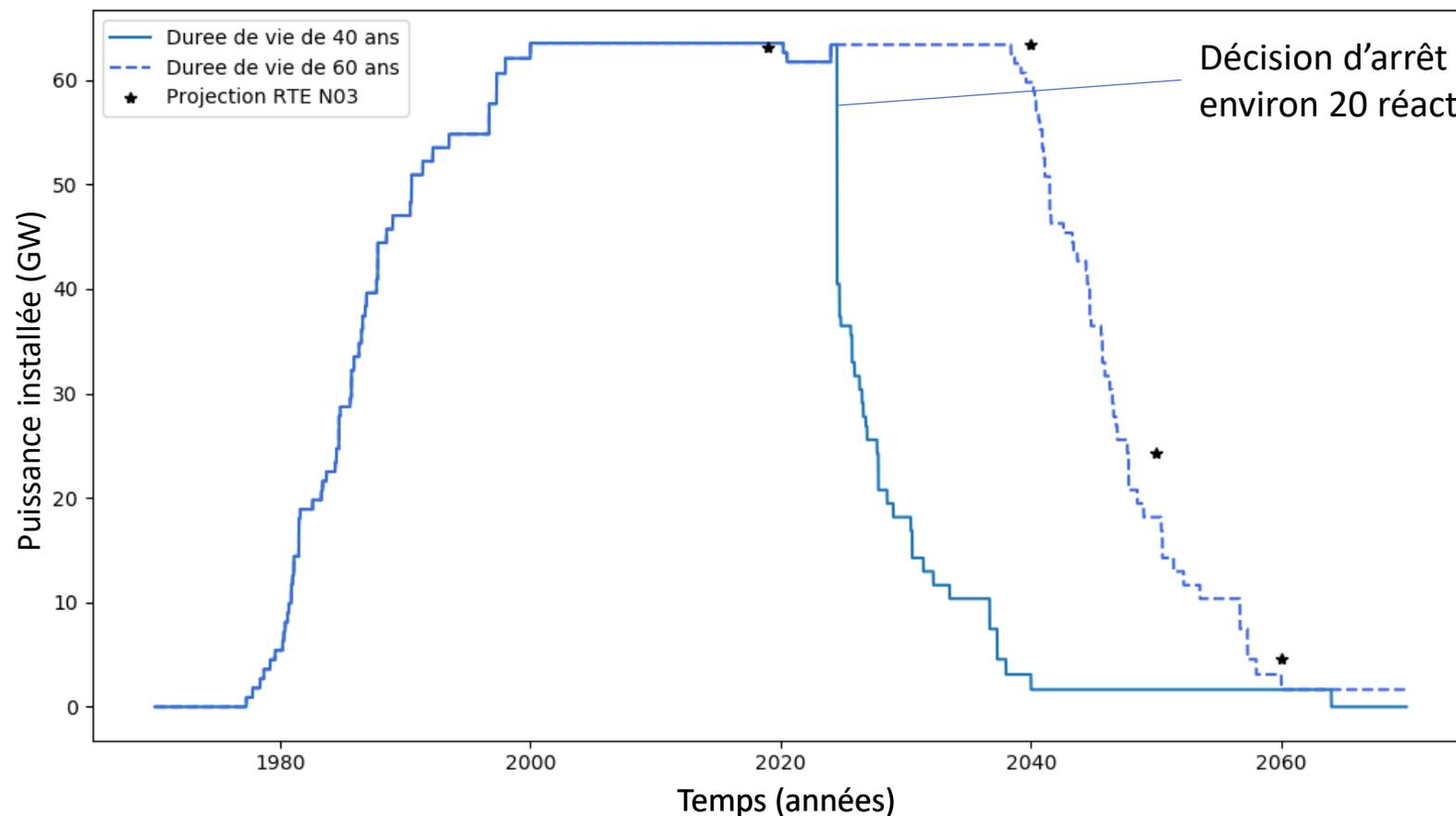
Chiffres à mettre en perspective des prospectives ENR :

Scénario « sans » nucléaire			Scénario « avec » nucléaire		
Solaire PV	Eolien terrestre	Eolien Off-shore	Solaire PV	Eolien terrestre	Eolien Off-shore
x 21 (→ 208 GW)	x4 (→ 74 GW)	62 GW	x11 (→ 118 GW)	x3,3 (→ 58 GW)	45 GW
x 22 (→ 214 GW)	x3,5 (→ 59 GW)	45 GW	x8,5 (→ 90 GW)	x2,9 (→ 52 GW)	36 GW
x 12 (→ 125 GW)	x4 (→ 72 GW)	60 GW	x7 (→ 70 GW)	x2,5 (→ 43 GW)	22 GW

# Introduction - Le génie nucléaire : une « discipline » issue de la physique nucléaire ?

Une problématique technique, sociale, politique...

➤ **Première mesure** : une **extension** systématique de la **durée de vie** des réacteurs pour éviter la « crise des 40 ans »



Décision d'arrêt au 1<sup>er</sup> juin 2024 si durée de vie > 40 ans : environ 20 réacteurs



➤ **Conséquence directe du plan Mesmer** :

- Construction de 6 à 7 réacteurs par an dans les années 80 en réponses aux chocs pétroliers
- 40 ans plus tard : fermeture de 6 à 7 réacteurs par an !

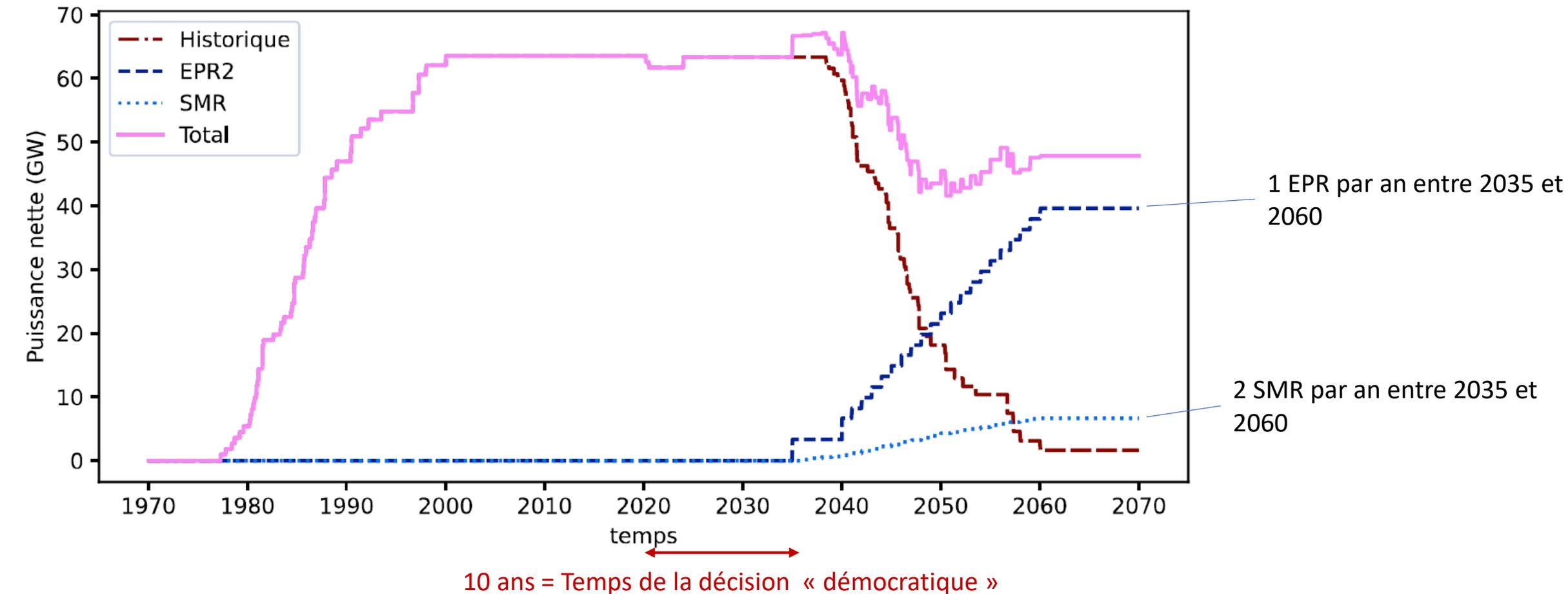
Une seule technologie en France :

- REP et leur évolution les EPR (voir partie 1)
- 56 réacteurs pour ~65% de l'électricité produite en 2023  
1 réacteur pour 1 million d'habitant

# Introduction - Le génie nucléaire : une « discipline » issue de la physique nucléaire ?

Une problématique technique, sociale, politique...

➤ **Seconde mesure** souhaitée par l'exécutif : **construction de nouveaux réacteurs** pour maintenir la production à long terme



➤ Gros stress sur la filière « historique »

→ Les 25 ans à venir sont clefs pour la relance du nucléaire

→ Début de la construction des nouveaux réacteurs (EPR2) avant 2030 pour une mise en service avant 2040

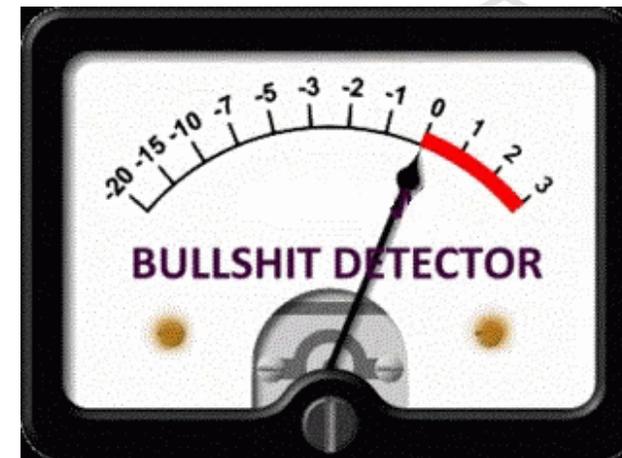
# Introduction - Le génie nucléaire : une « discipline » issue de la physique nucléaire ?

Une problématique technique, sociale, politique...

- Des nouveaux acteurs dédiés à l'« innovation » : les start-ups du nucléaire  
→ Nouveau modèle économique = communication « agressive » ?

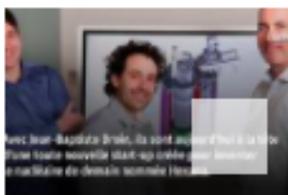
L'OBS société politique écologie

a Naarea, la start-up qui



**Promesse d'un nucléaire « idéal » tout de suite**

- Sans déchets
- Sans consommation de ressources
- Pas chers
- « Intrinsèquement » sur



Vers  
LEPO  
09/03



## 1. Physique des réacteurs 101

1. Energie nucléaire = énergie de masse ?
2. La fission et la réaction en chaîne
3. Interaction neutron/matière
4. Modération des neutrons et réacteurs à neutrons thermiques

## 2. Matières ou déchets ?

1. L'évolution du combustible pendant l'irradiation
2. Définition des déchets et conséquences
3. La gestion des déchets Haute-Activité à Vie Longue : CIGEO
4. L'impact du mono-recyclage du plutonium sur l'inventaire radiotoxique

## 3. Les ressources et la régénération du fissile

1. L'économie possible dans le cycle actuel
2. Les ressources mondiales
3. La régénération = changement de technologie des réacteurs
4. Pour aller plus loin : la transmutation des actinides mineurs

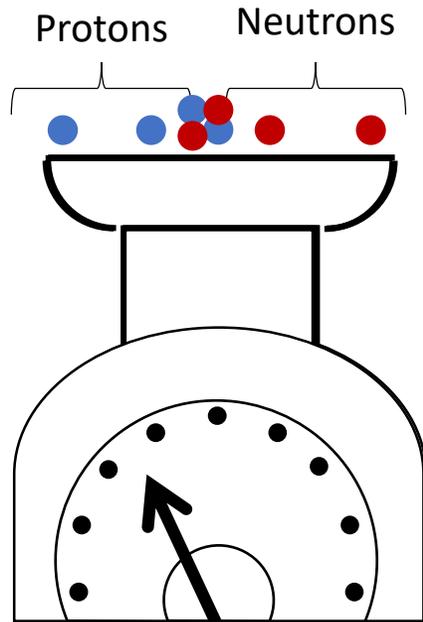
## 4. Retour sur les études de scénarios

1. Quelques définitions liés aux scénarios
2. Les scénarios « de référence »
3. La place des AMR dans le mix énergétique

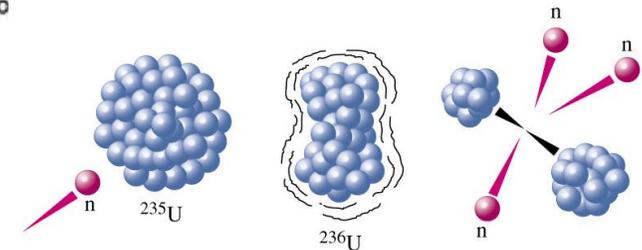
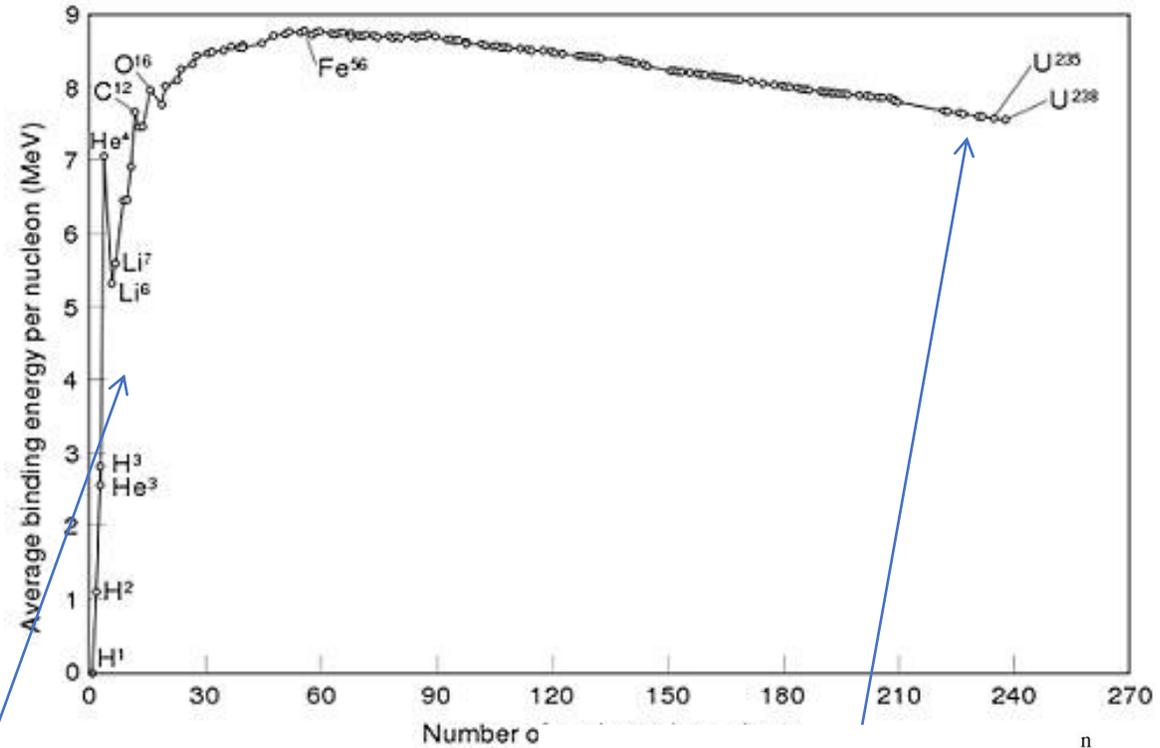
### Ce qui ne sera pas abordé :

- La prise de décision  
*Interface nucléaire et politique*
- L'organisation de la filière  
*Fusion ASN/IRSN et interface avec EDF*
- Les accidents  
*Impact et conséquences de Fukushima*
- L'économie du nucléaire  
*Le marché de l'électricité et ses conséquences*

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



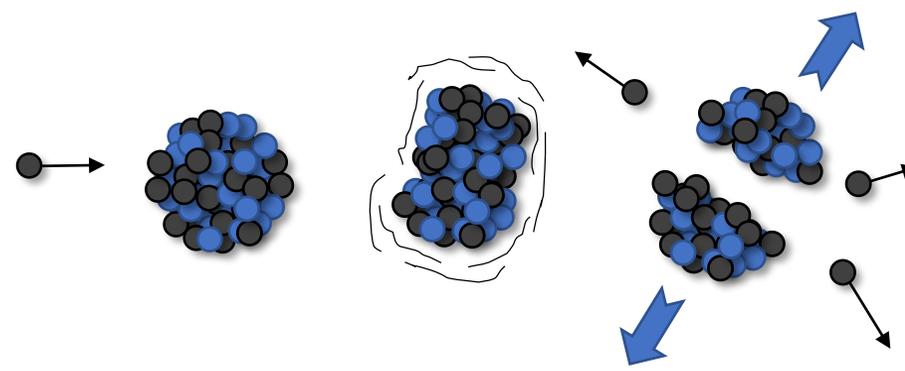
**Le défaut de masse quantifie la liaison des nucléons dans le noyau**



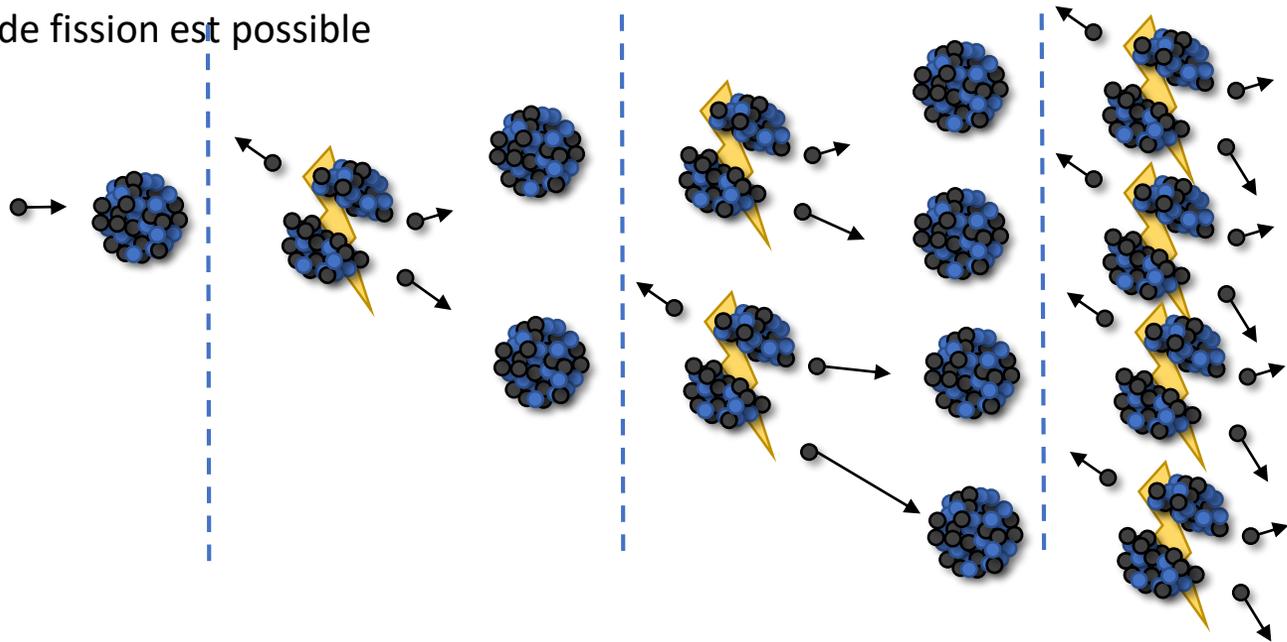
**1 réaction de fission (200 MeV) =  
8 millions de réaction de combustion**

## La fission

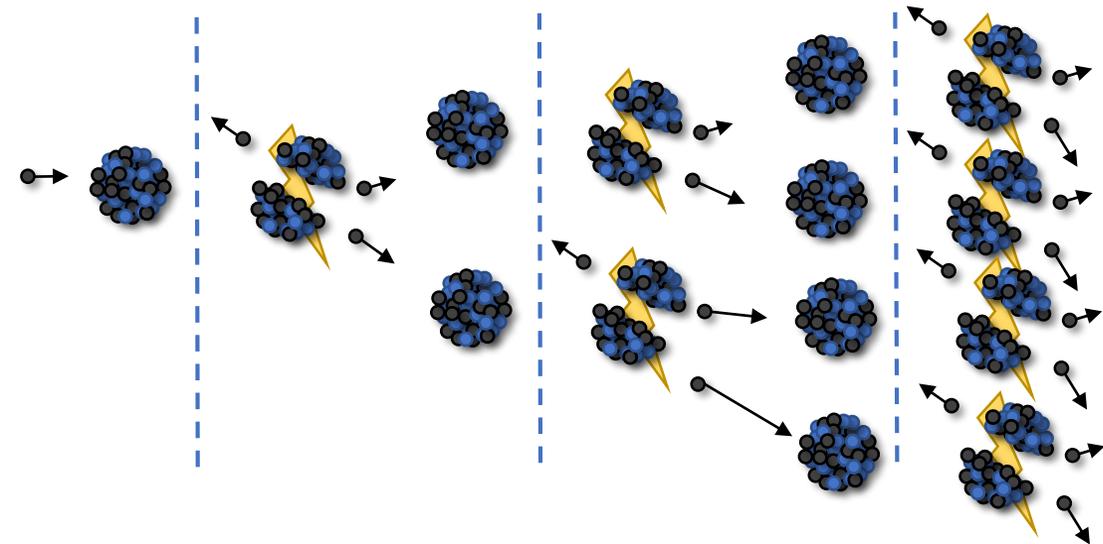
- Energie **nucléaire** : énergie associée à la **cohésion des nucléons** dans un noyau  
→ *Modification de l'organisation des particules du noyau*
- **La fission nucléaire** = production de deux noyaux « très liés » à partir d'un noyau lourd  
→ 2 « *produits de fission* »  
→  $\sim 200 \text{ MeV}$  d'énergie ( $= 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Joules}$ )  
→ 2 à 3 neutrons
- Seuls les **noyaux « lourds »** peuvent **fissionner** :  
→ *L'élément le plus lourd qu'on peut trouver sur terre est l'Uranium*  
→  **$^{235}\text{U}$**  (92 protons et 143 neutrons) = seul isotope **fissile** (qui peut fissionner après l'absorption d'un neutron quelque soit sa vitesse)



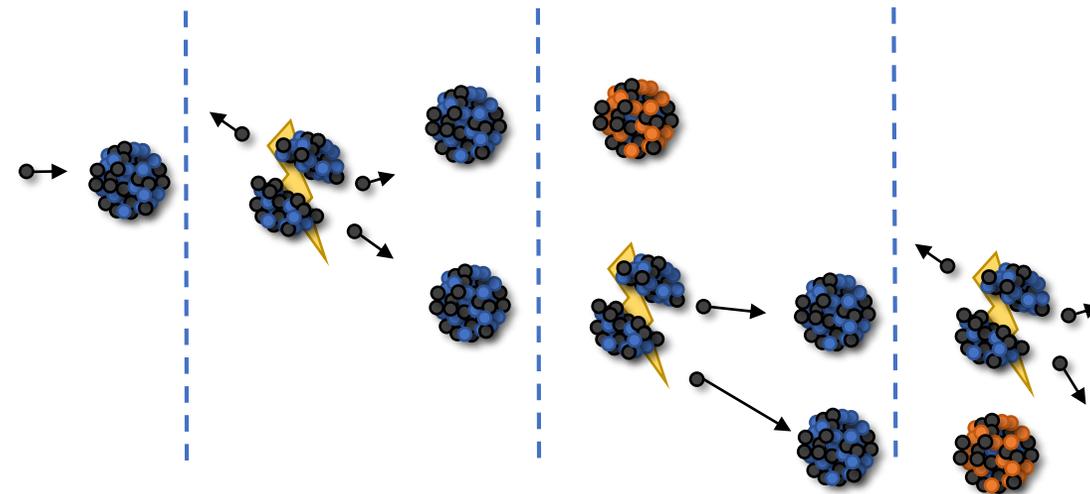
- La réaction en chaîne de fission est possible



## La réaction en chaîne

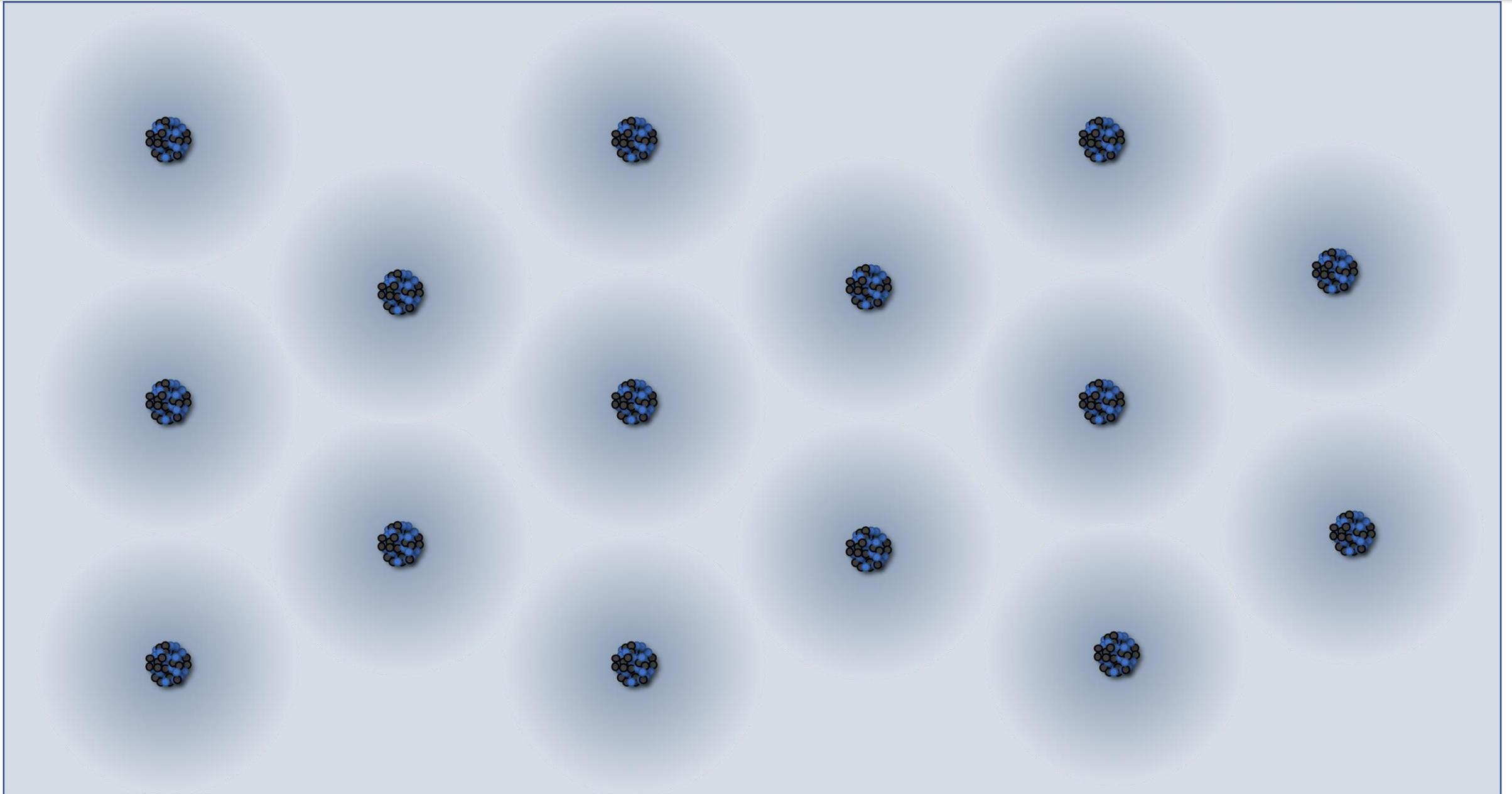


- Chaque fission engendre 2 nouvelles fissions
  - La puissance est à la hausse
  - Le système est sur-critique
- Le bilan neutronique est déséquilibré
  - La production de neutron est supérieur à leur disparition

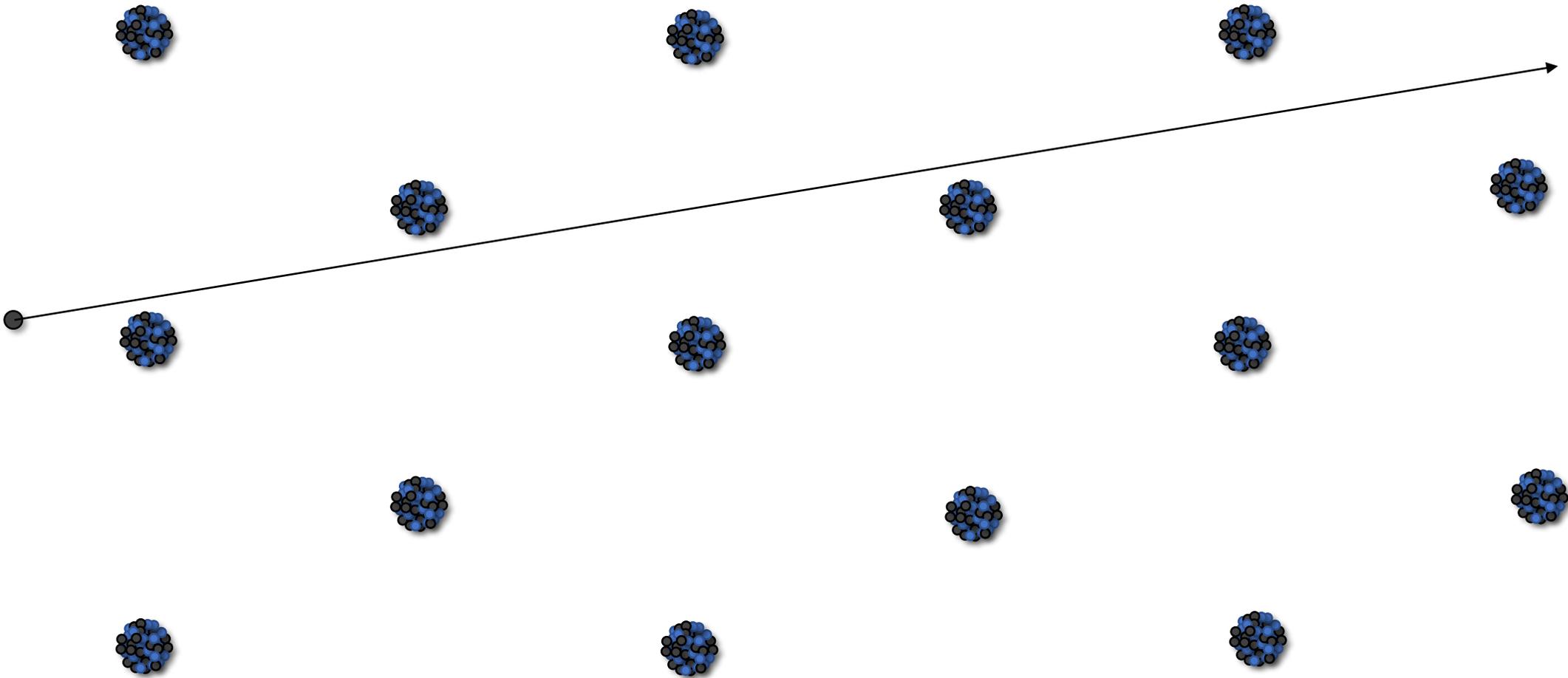


- Chaque fission engendre exactement 1 nouvelle fission
  - La puissance est stable
  - Le système est critique
- Le bilan neutronique est équilibré
  - La production de neutron égale à leur disparition

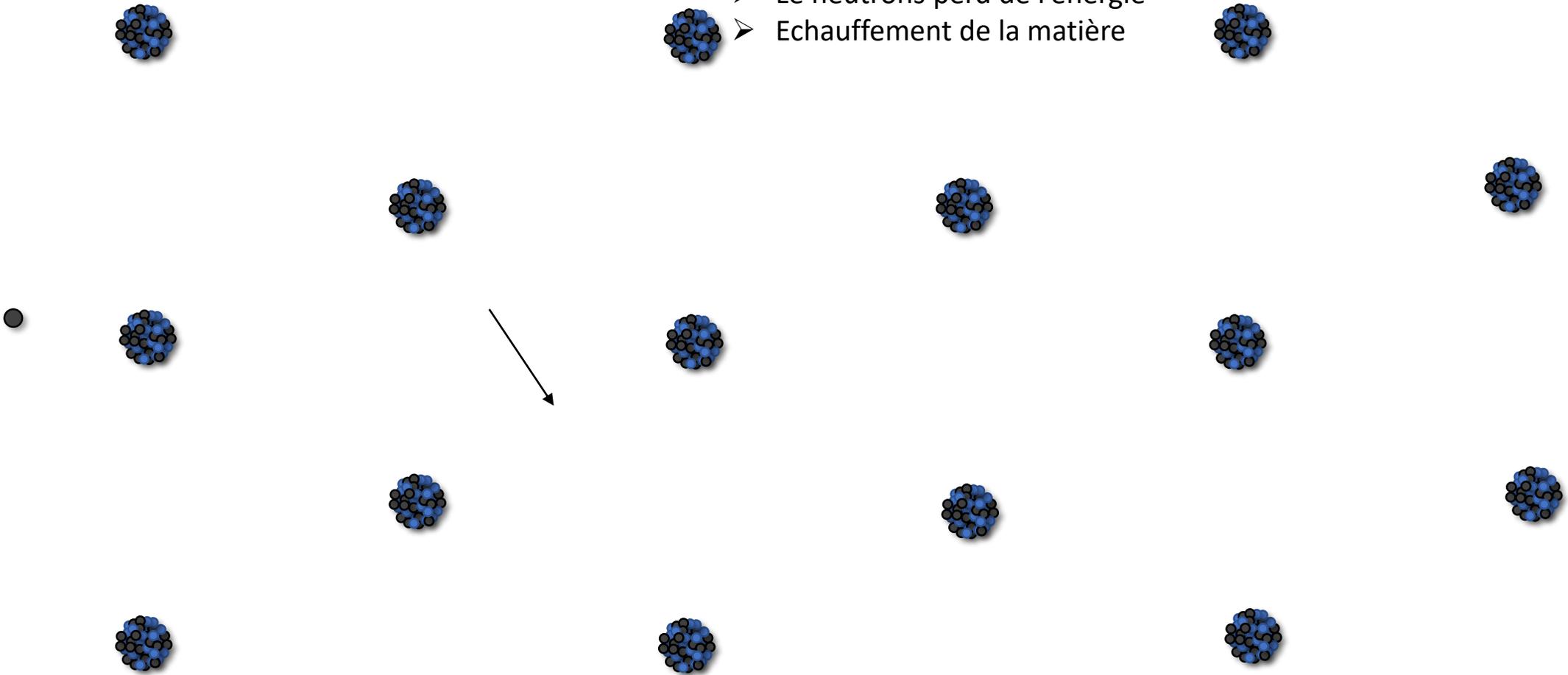
➤ Un réacteur en fonctionnement est critique, quelque soit le niveau de puissance !



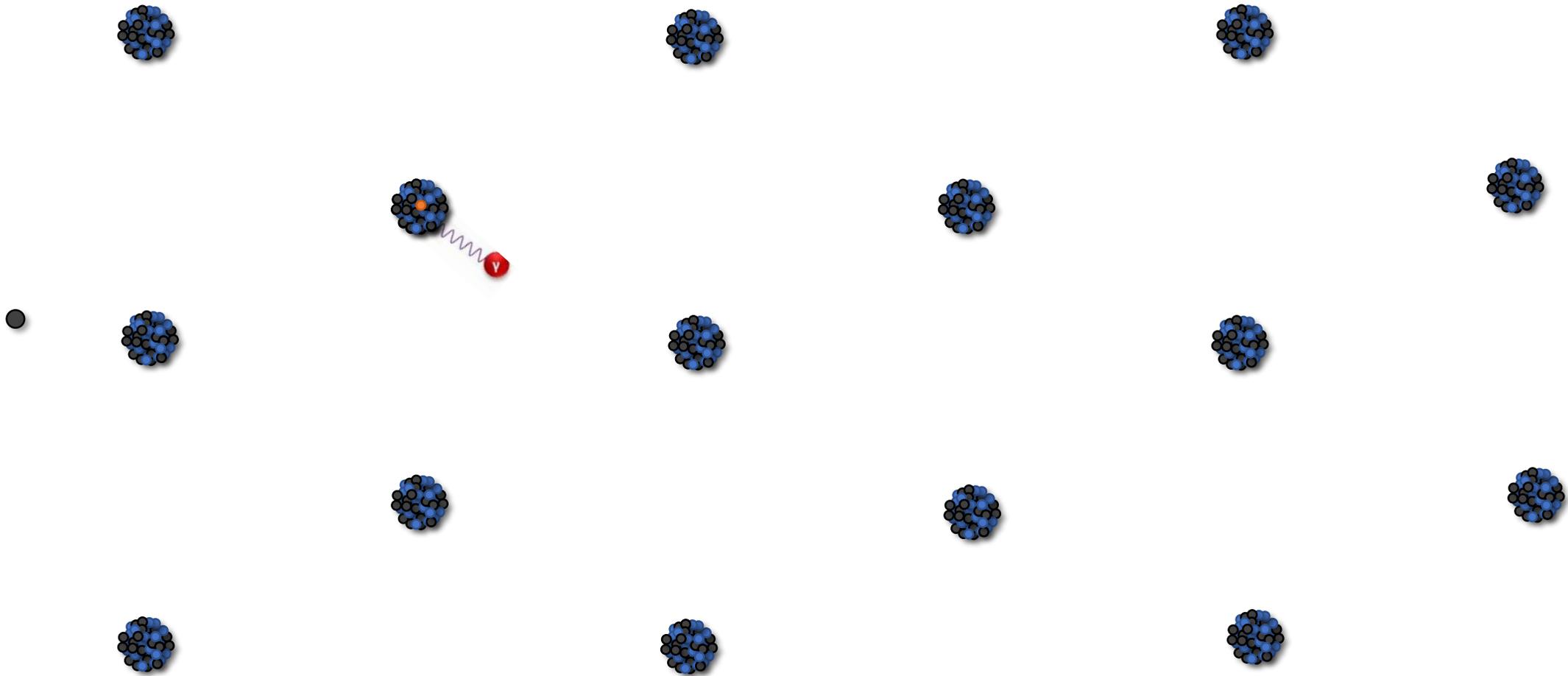
➤ Les neutrons parcourent de grandes distances sans interagir avec la matière



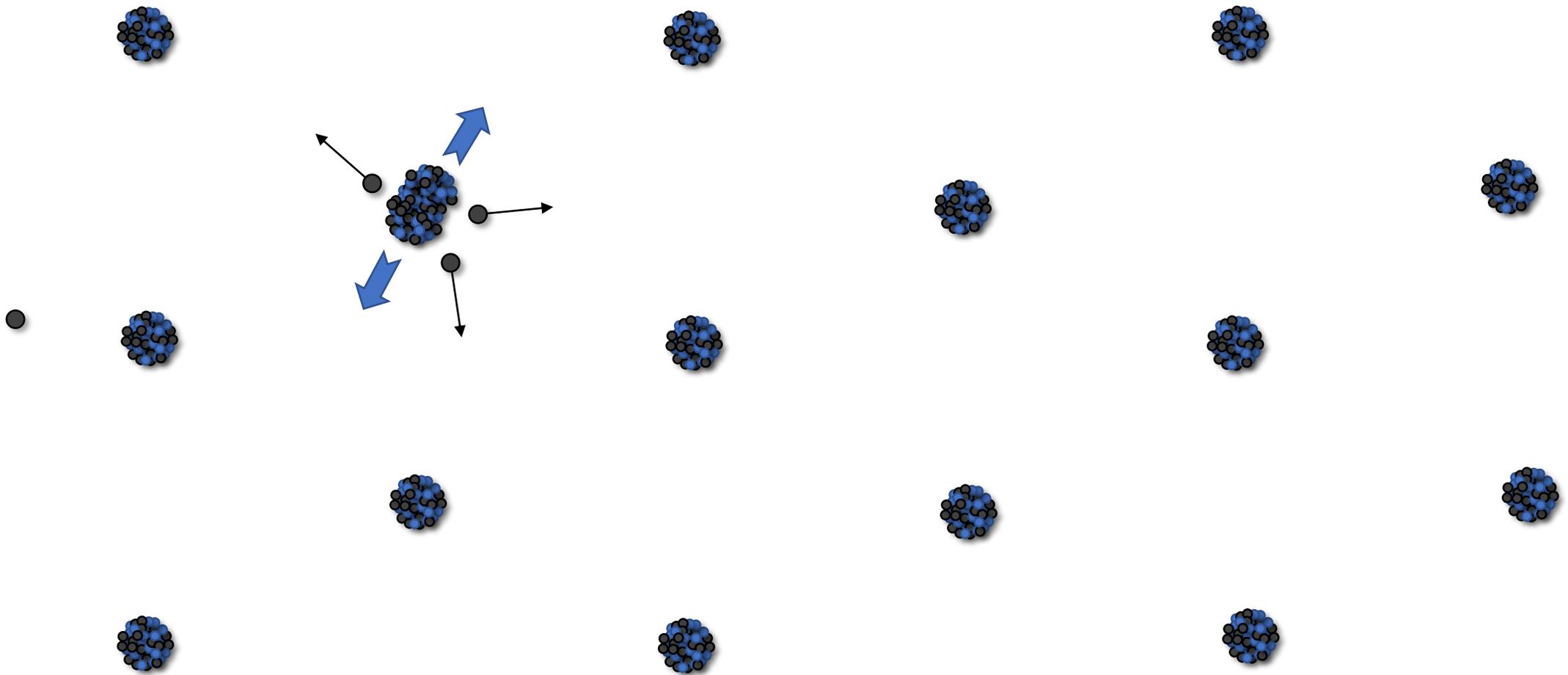
- L'interaction la plus probable suit la loi d'un choc élastique (physique du billard)
- Le neutrons perd de l'énergie
- Echauffement de la matière



- Parfois le neutron est absorbé dans le noyau : il y a formation d'un nouveau noyau (dans un état excité)



➤ Quand les conditions sont réunies, l'absorption peut conduire à une fission



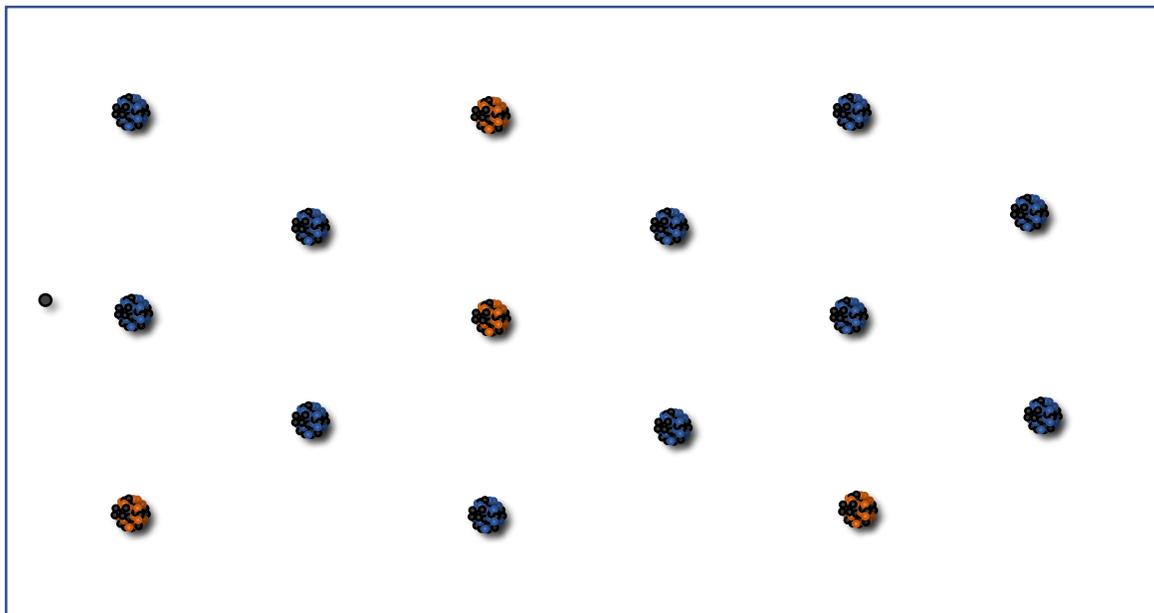
- Pour avoir une réaction en chaîne, il faut qu'un neutron émis par la fission (sur les 2,5 émis en moyenne) conduise à une fission

Production des neutrons	Disparitions des neutrons
$\nu \times \text{Nombre de fission}$	$\text{Nombre total d'absorption}$ + $\text{fuites}$

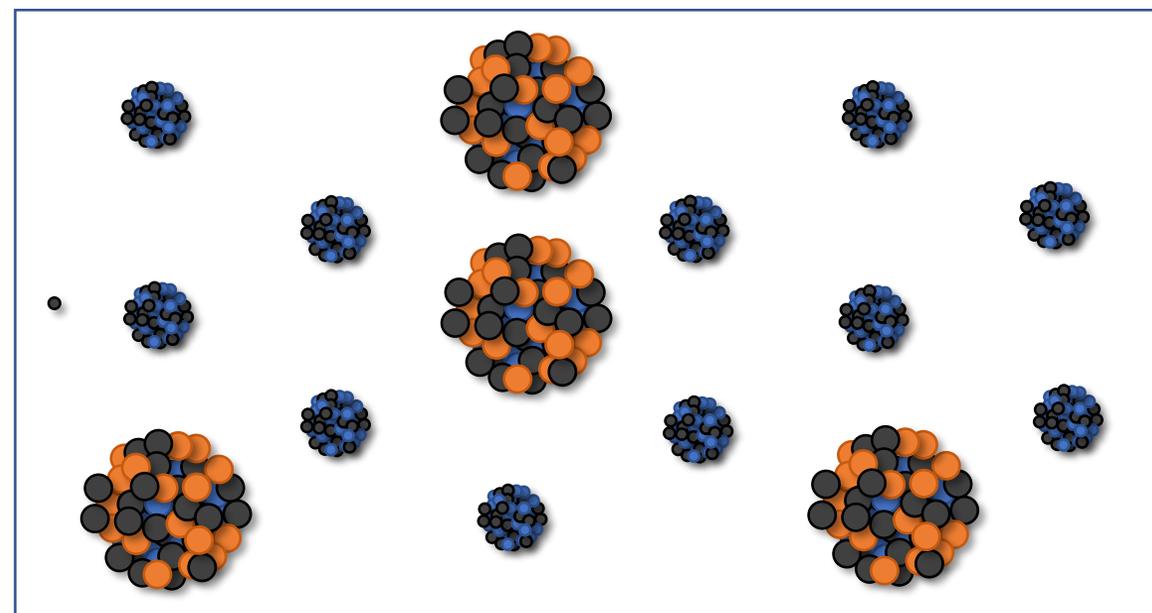
- Pour avoir une réaction en chaîne, il faut qu'un neutron émis par la fission (sur les 2,5 émis en moyenne) conduise à une fission

Production des neutrons	Disparitions des neutrons
$\nu \times \text{Nombre de } ^{235}\text{U} \times \text{probabilité de fission}$	$\text{Nombre de } ^{235}\text{U} \times \text{probabilité de réaction}$ + $\text{Nombre de } ^{238}\text{U} \times \text{probabilité de réaction}$ + <i>fuites</i>

- Les probabilités d'interaction des neutrons avec les noyaux dépendent de la « taille » des noyaux vu par le neutron

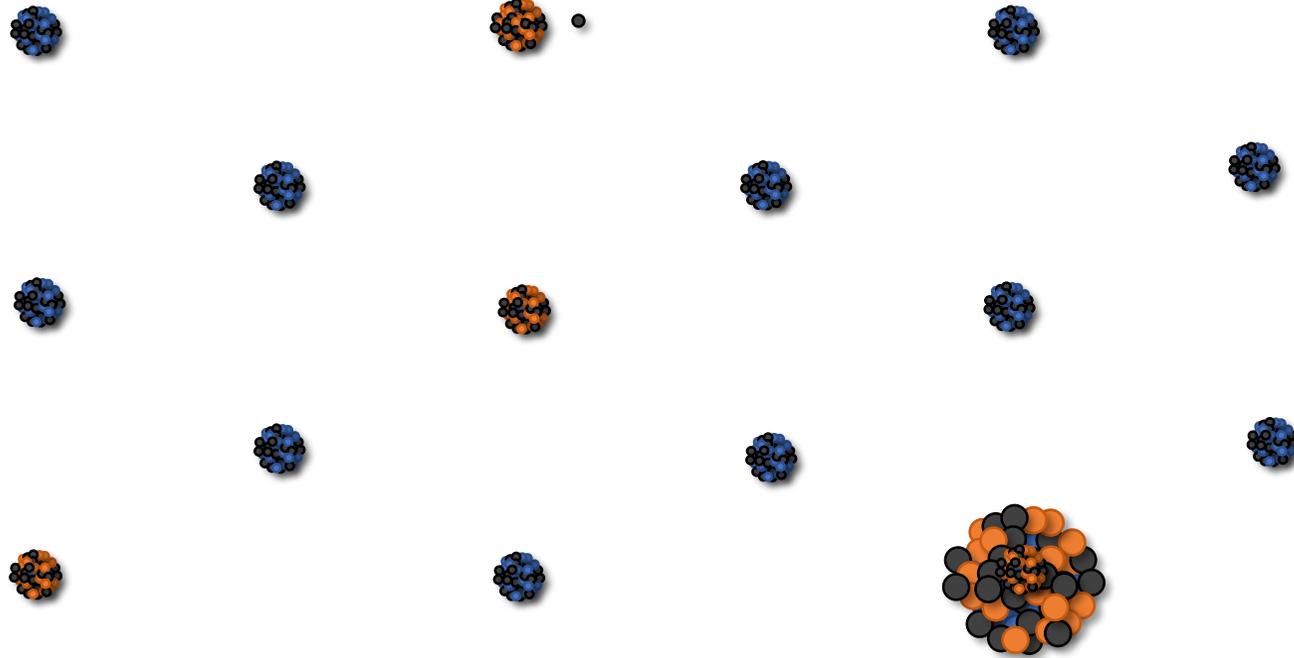


→ Matière « vue » par un neutron rapide

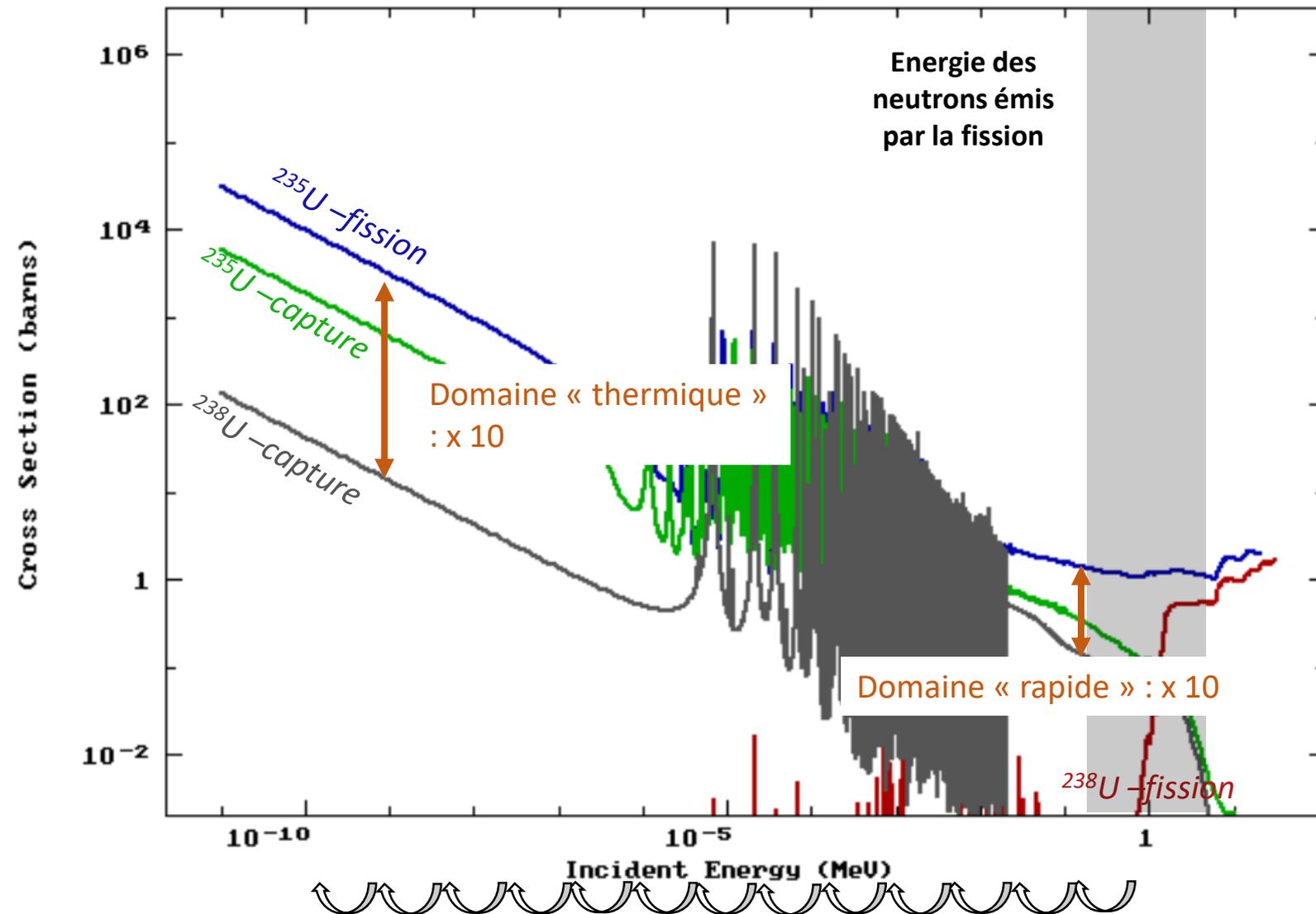


→ Matière « vue » par un neutron lent

- Deux leviers qui permettent de favoriser la fission par rapport aux captures
  1. *Ralentir les neutrons*
    - *Choc élastique (physique de la pétanque)*



*Ecoulement de l'eau pour refroidir le combustible*



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

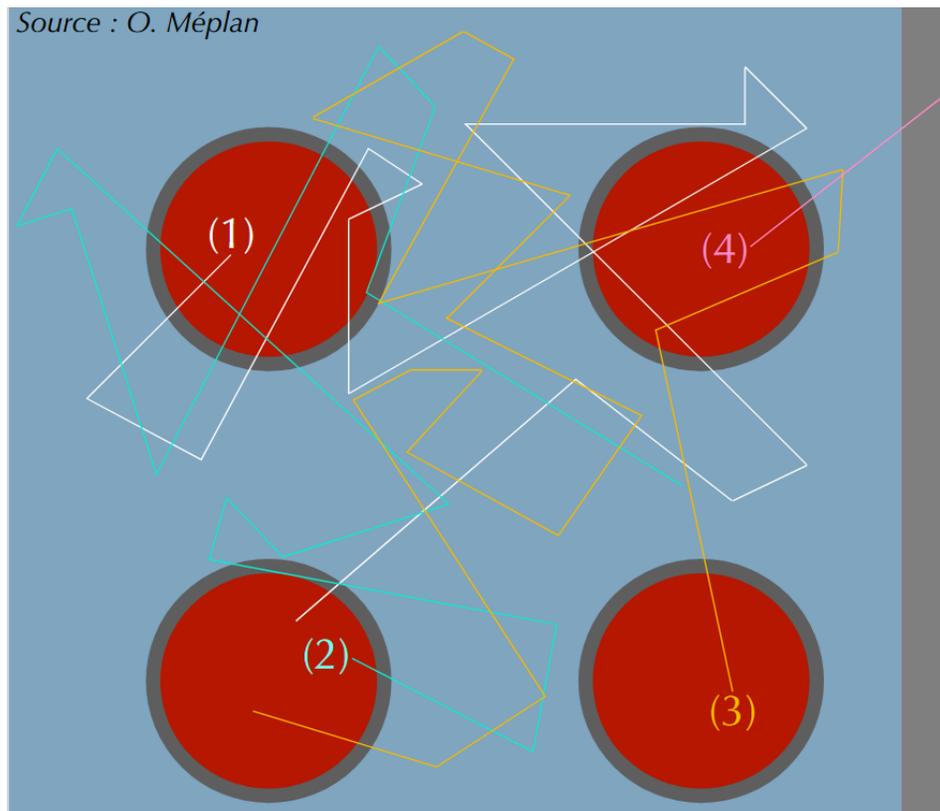
➤ Il faut considérer le **ratio** des sections efficaces

- ➔ *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

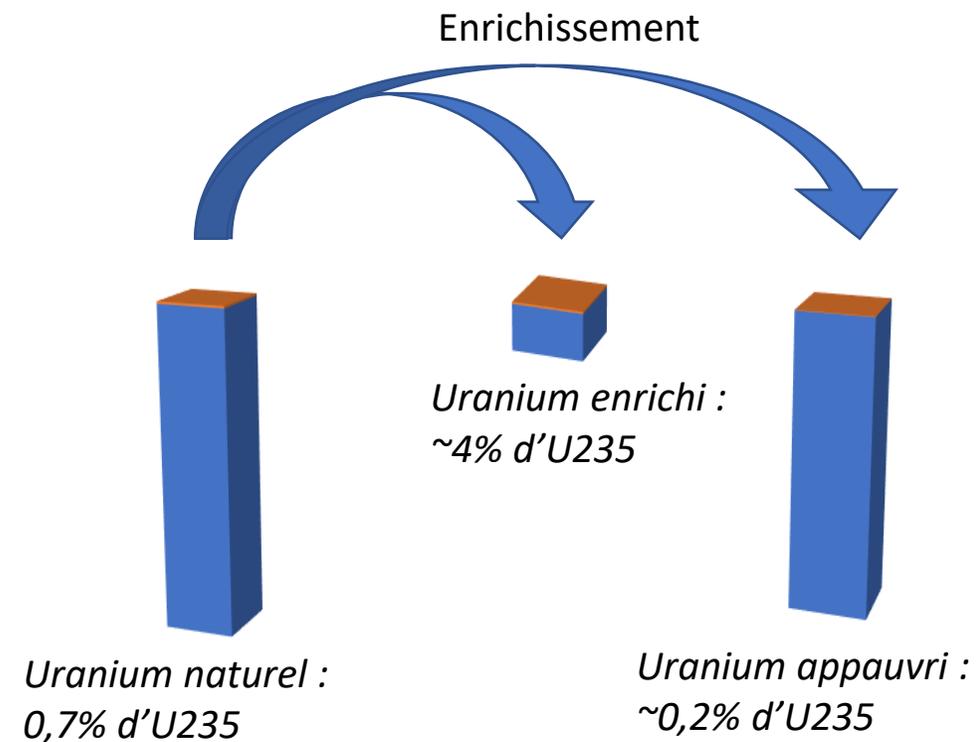
- Deux leviers qui permettent de favoriser la fission par rapport aux captures
  1. *Ralentir les neutrons*
  2. *Enrichir le combustible en noyau fissile pour compenser les captures parasites*

Source : O. Méplan

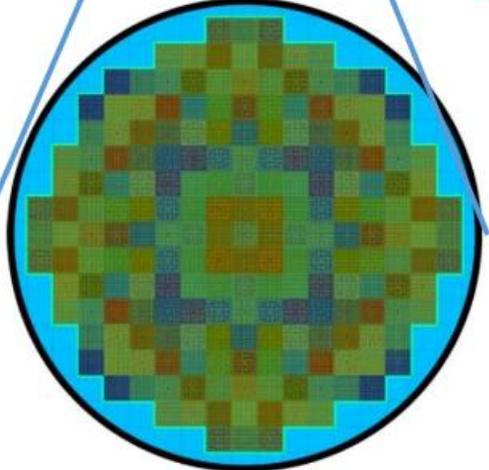
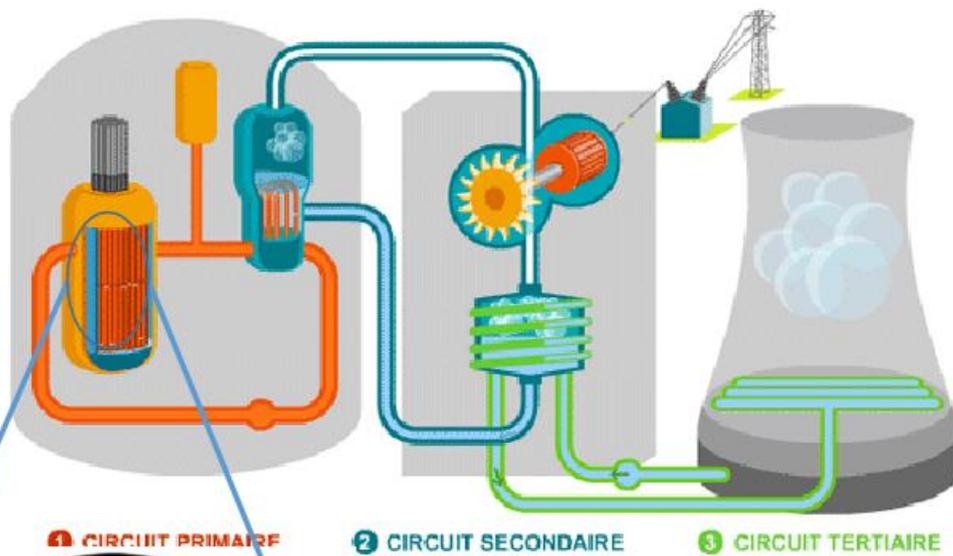


Source : O. Méplan

- ▶ Histoire (1)
  - Modération dans l'eau
  - Diffusion dans l'eau
  - Fission dans le combustible
- ▶ Histoire (2)
  - Modération dans l'eau
  - Diffusion dans l'eau
  - Capture par H de l'eau
- ▶ Histoire (3)
  - Modération dans l'eau
  - Diffusion dans l'eau
  - Capture par l'uranium
- ▶ Histoire (4)
  - Fuite en dehors du cœur



- L'eau qui permet l'extraction de la chaleur (et la transformation de l'énergie) 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

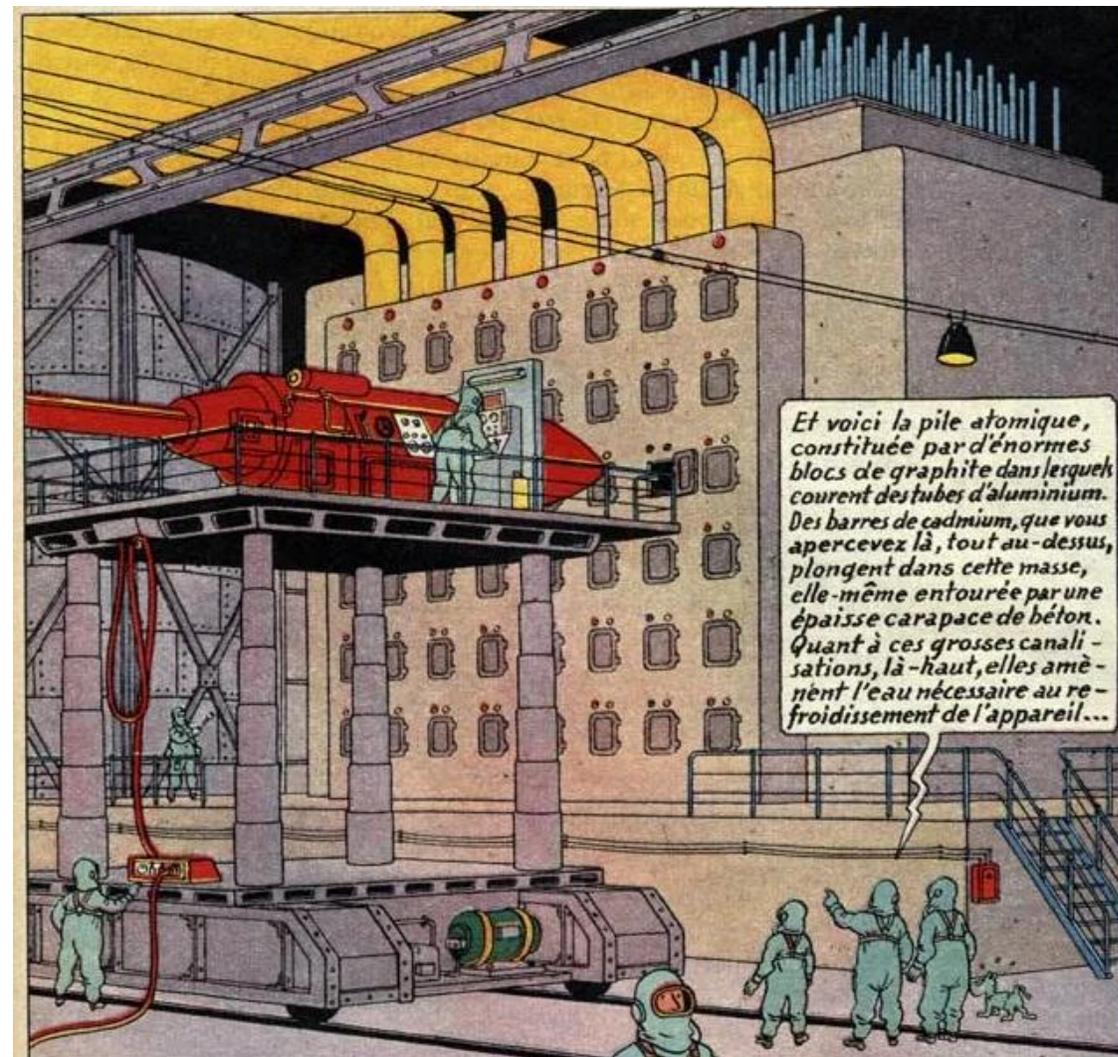


## Le compromis enrichissement/ralentissement

➤ D'autres choix sont possibles

→ Uranium naturel, modération au graphite

→ Le réacteur du professeur tournesol (*Tintin objectif lune* - 1953) = Pile de Harwell (GB), Handford B (US) Belgium Reactor 1



Et voici la pile atomique, constituée par d'énormes blocs de graphite dans lesquels courent des tubes d'aluminium. Des barres de cadmium, que vous apercevez là, tout au-dessus, plongent dans cette masse, elle-même entourée par une épaisse carapace de béton. Quant à ces grosses canalisations, là-haut, elles amènent l'eau nécessaire au refroidissement de l'appareil...



En ce moment, on introduit une barre d'uranium dans la pile. Cet uranium, qui est un corps radioactif, contient environ 99% d'U.238 et 1% d'U.235... Maintenant, que se passe-t-il, une fois la barre d'uranium introduite dans la pile?...

Je n'en sais fichtre rien!



Eh bien, voici... Un atome d'U.235 se désintègre spontanément, projetant ainsi deux ou trois neutrons animés d'une grande vitesse. L'un ou l'autre de ces neutrons est absorbé par un atome d'U.238, qui se trouve ainsi transformé en plutonium. Vous me suivez toujours?

Euh... Du plutonium, c'est cela, oui... Je... Dites donc, elle est formidable cette pile!





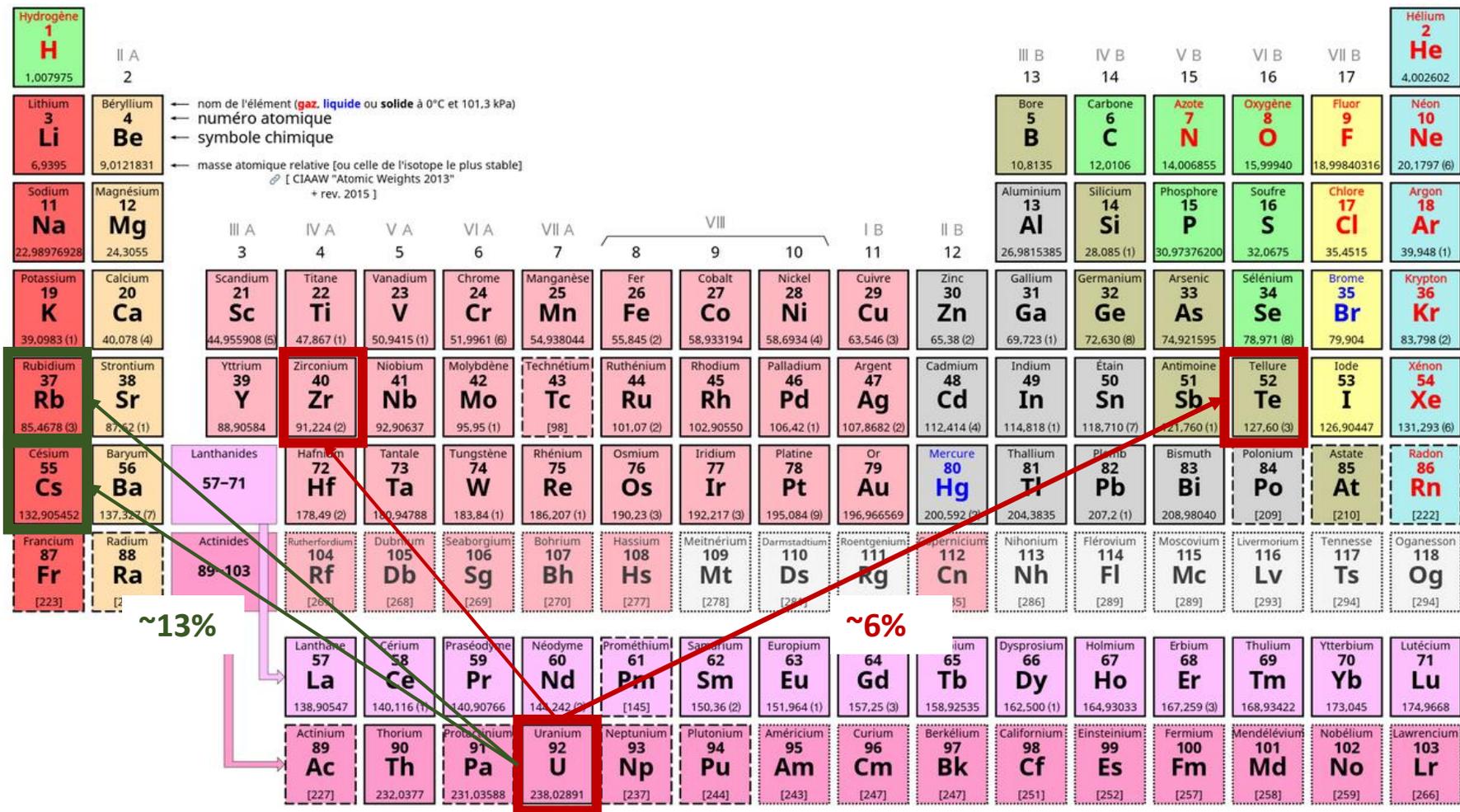
- **L'énergie nucléaire (de fission) repose sur une réaction en chaîne de fission**
  - Un réacteur en fonctionnement est « critique » : le nombre de fission est stable dans le temps !
  - Une fission peut être provoquée suite à l'absorption d'un neutron par un noyau lourd  
L'uranium 235 est le seul noyau fissile présent sur terre
- **Pour rendre possible la réaction en chaîne deux options possibles**
  - Enrichir le combustible
  - Ralentir les neutrons issus de la fission
- **De nombreuses technologies de réacteurs sont possibles**
  - Nombreux intérêt pour la filière à eau légère qui représentent près de 80% des réacteurs de puissance

1. Physique des réacteurs 101 et sans équation
2. Matières ou déchets ?
  1. L'évolution du combustible pendant l'irradiation
  2. Définition des déchets et conséquences
  3. La gestion des déchets Haute-Activité à Vie Longue : CIGEO
  4. L'impact du mono-recyclage du plutonium sur l'inventaire radiotoxique
3. Les ressources et la régénération du fissile
4. Les scénarios nucléaires

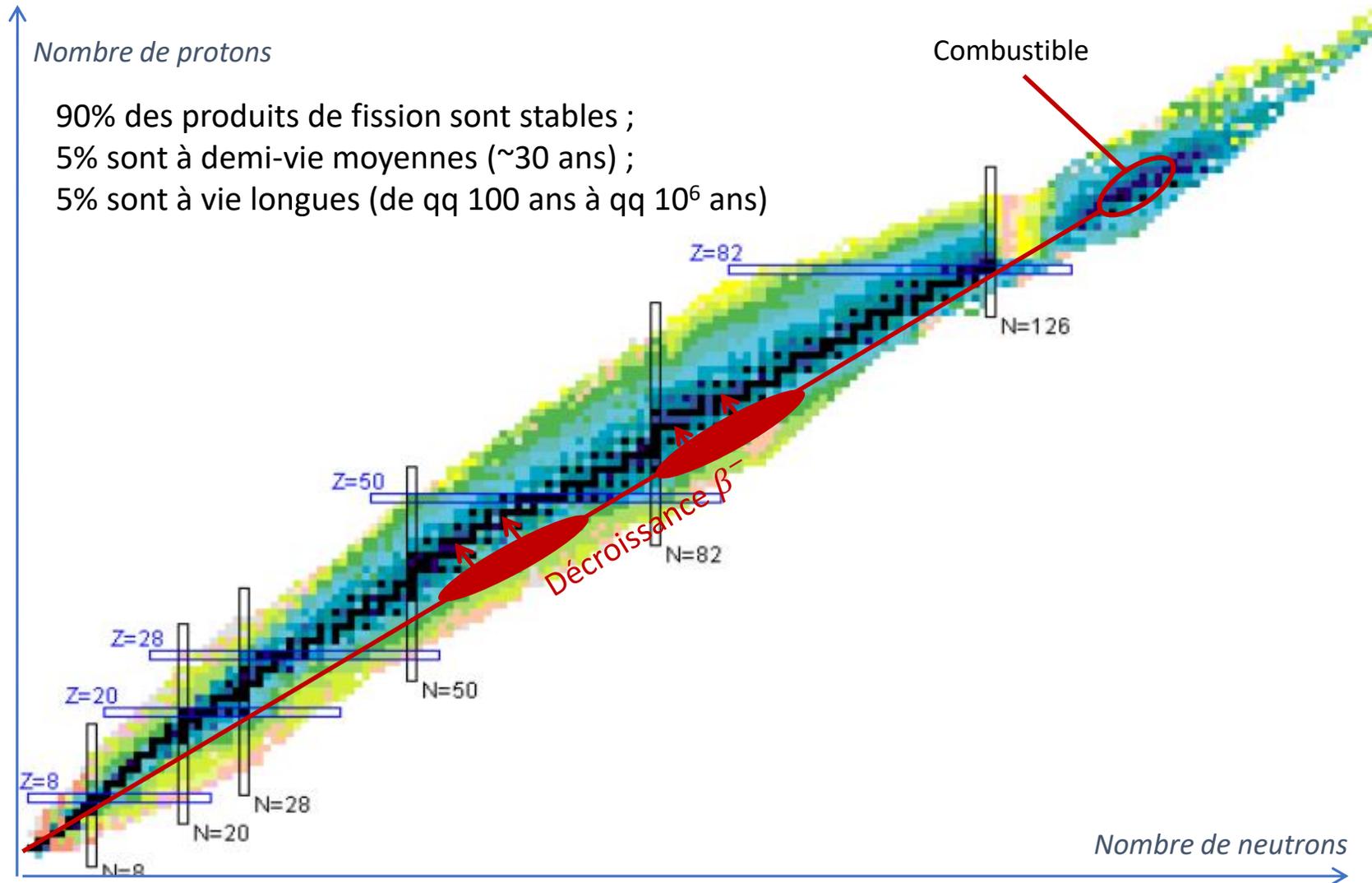
# Partie 2 : Matière ou déchet ?

## Evolution du combustible : apparition des Produits de Fission

- La réaction en chaîne transforme la matière
  - ➔ La fission conduit à la formation de deux noyaux « légers » dont la quantité est directement proportionnelle à l'énergie produite



- La réaction en chaîne transforme la matière
  - La fission conduit à la formation de deux noyaux « légers » dont la quantité est directement proportionnelle à l'énergie produite

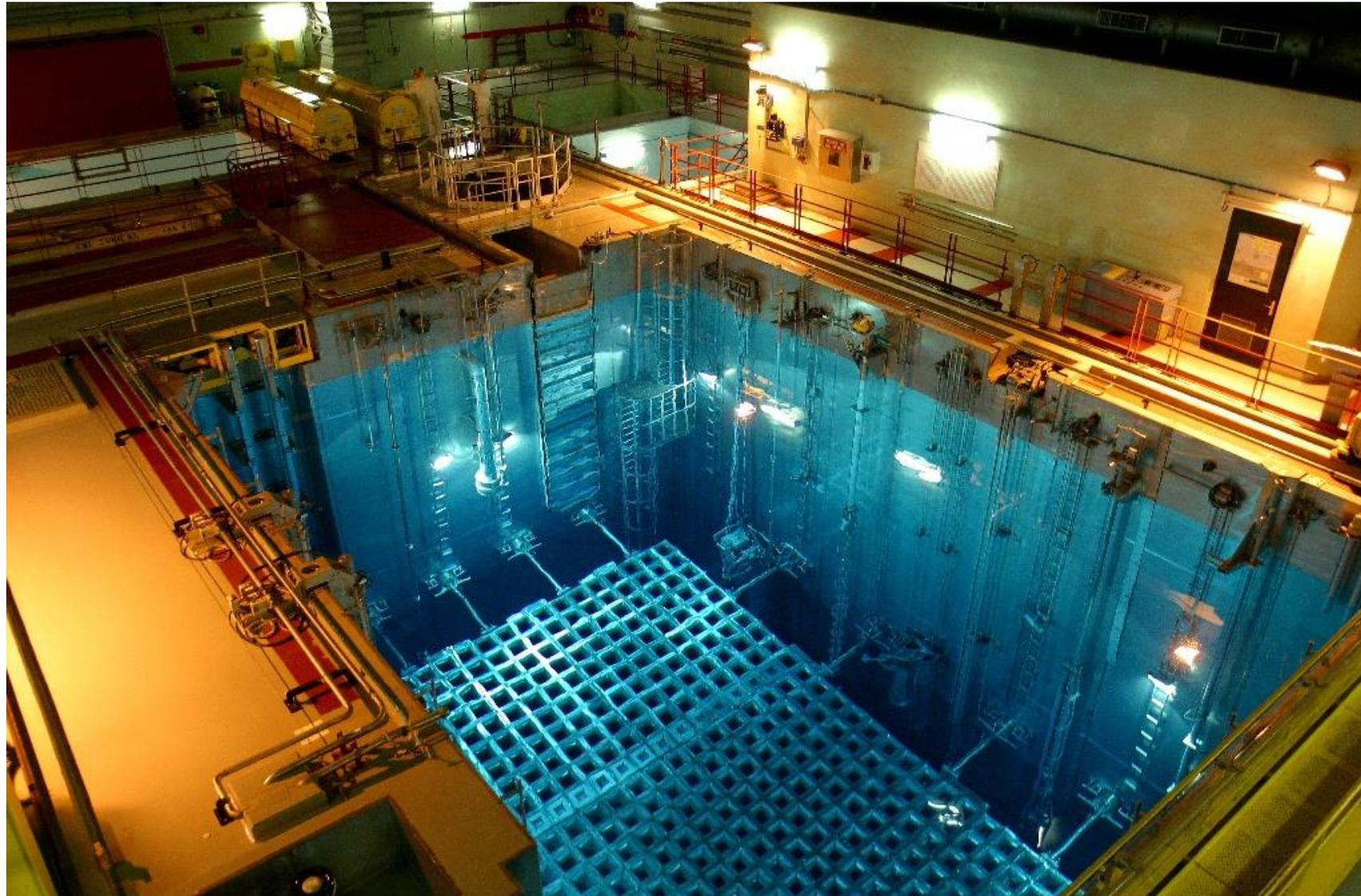


- La formation des PF est aléatoire, mais les noyaux formés comportent généralement trop de neutrons

Même à l'arrêt, le combustible chauffe (fort)  
→ Puissance résiduel représente ~7% de la puissance nominale

7% de 3GWth, c'est bcp...

- La réaction en chaîne transforme la matière
  - La fission conduit à la formation de deux noyaux « légers » dont la quantité est directement proportionnelle à l'énergie produite



- La formation des PF est aléatoire, mais les noyaux formés comportent généralement trop de neutrons

Même à l'arrêt, le combustible chauffe (fort)

→ Puissance résiduel représente ~7% de la puissance nominale

*7% de 3GWth, c'est bcp...*

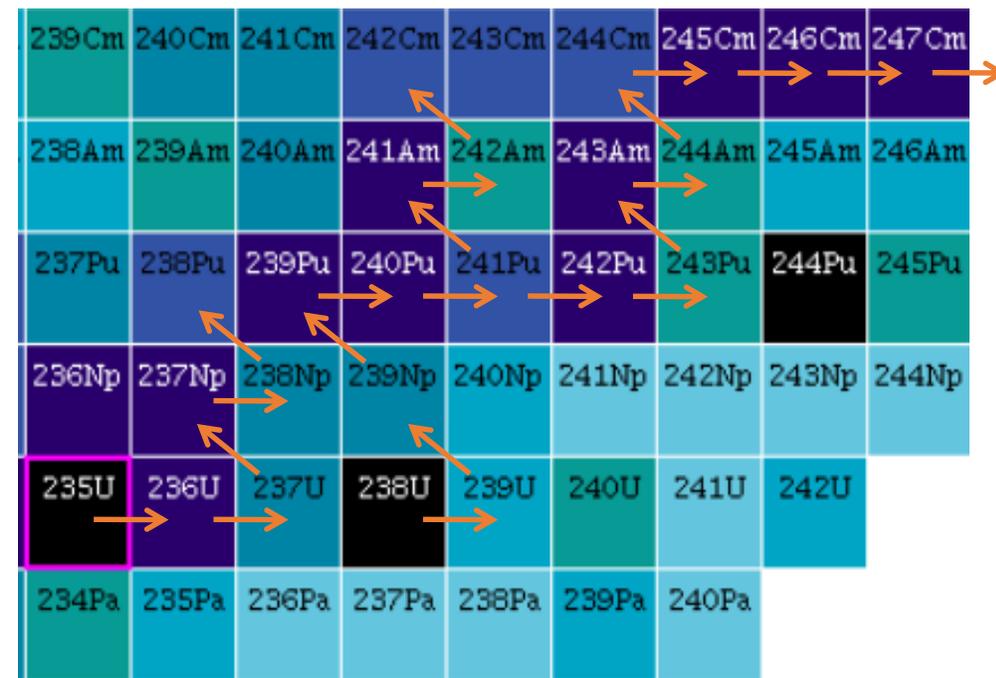
# Partie 2 : Matière ou déchet ?

## Evolution du combustible : formation des noyaux lourds

➤ L'uranium ne fissionne pas toujours... et produits des noyaux (+) lourds

Tableau périodique des éléments chimiques. Les éléments Cm, Am, Pu, Np, U, et Pa sont encadrés en rouge. Des flèches rouges pointent de ces éléments vers le diagramme de la chaîne de fission à droite.

Cm  
Am  
Pu  
Np  
U  
Pa



Nombre de nucléons

➤ Les noyaux lourds formés pendant le fonctionnement gardent un potentiel énergétique (puisque'ils sont suffisamment gros pour fissionner)

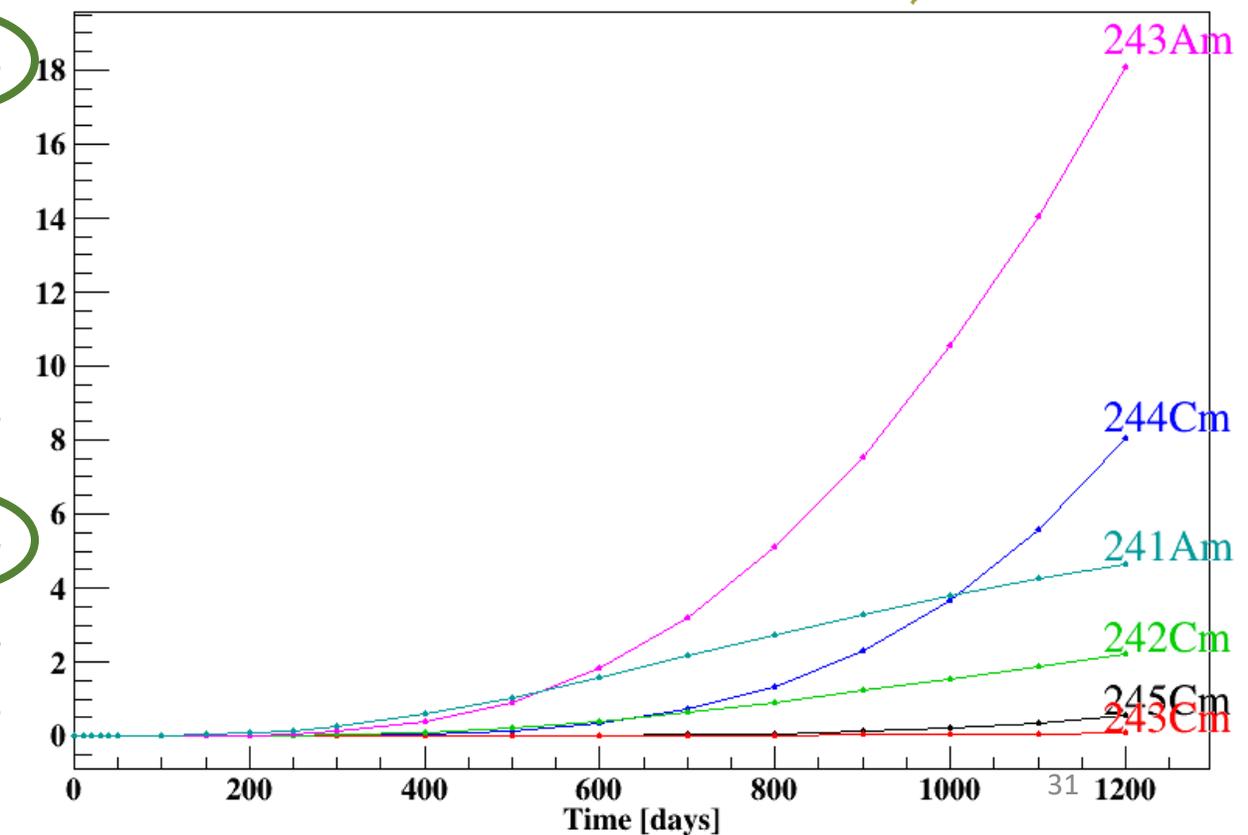
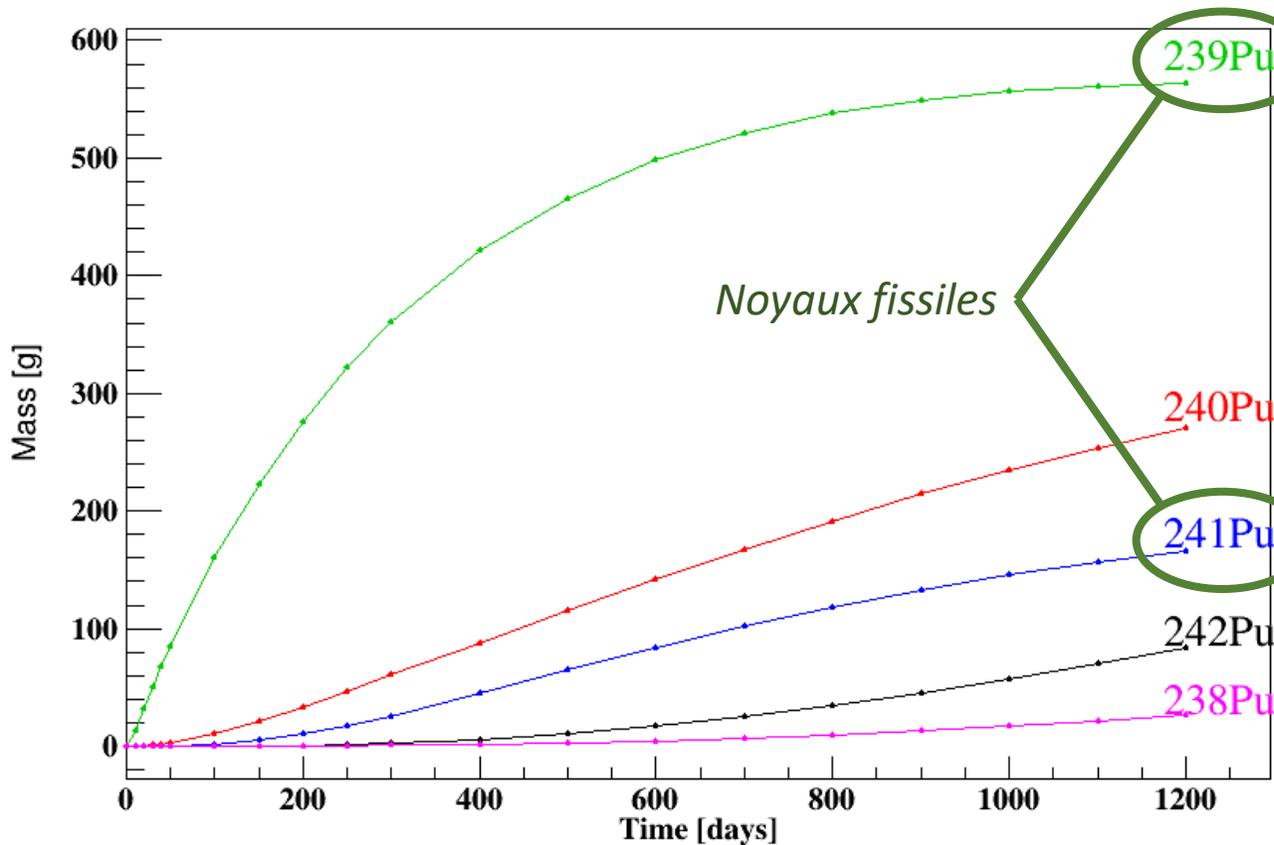
# Partie 2 : Matière ou déchet ?

## Evolution du combustible : formation des noyaux lourds

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

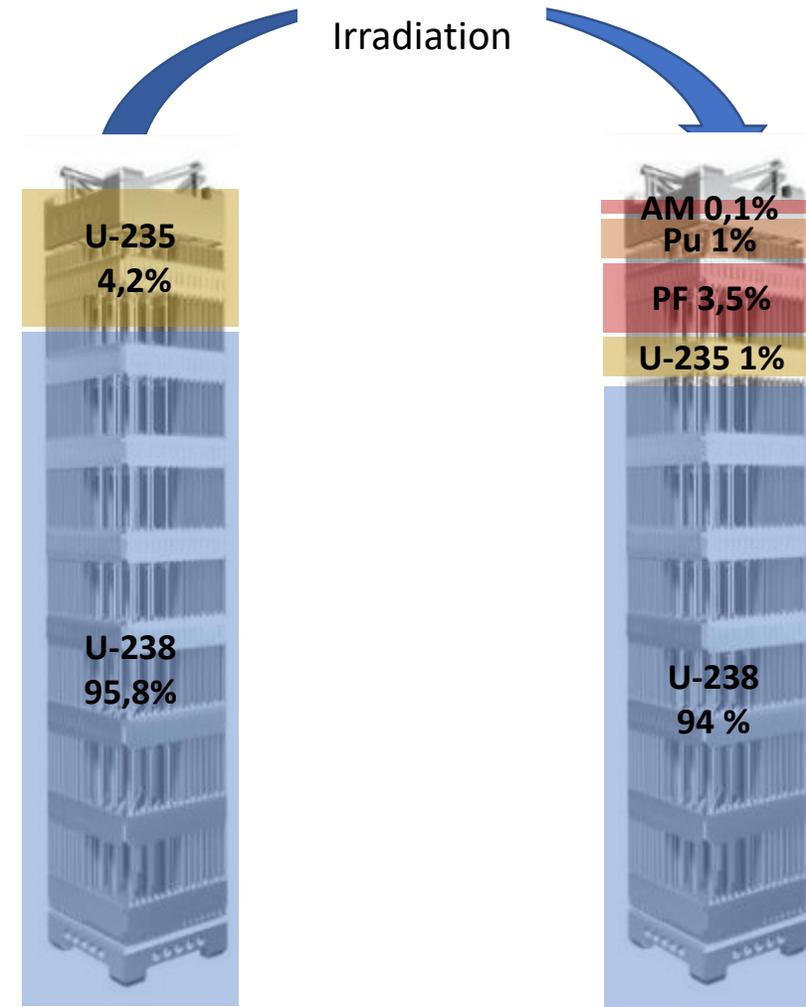
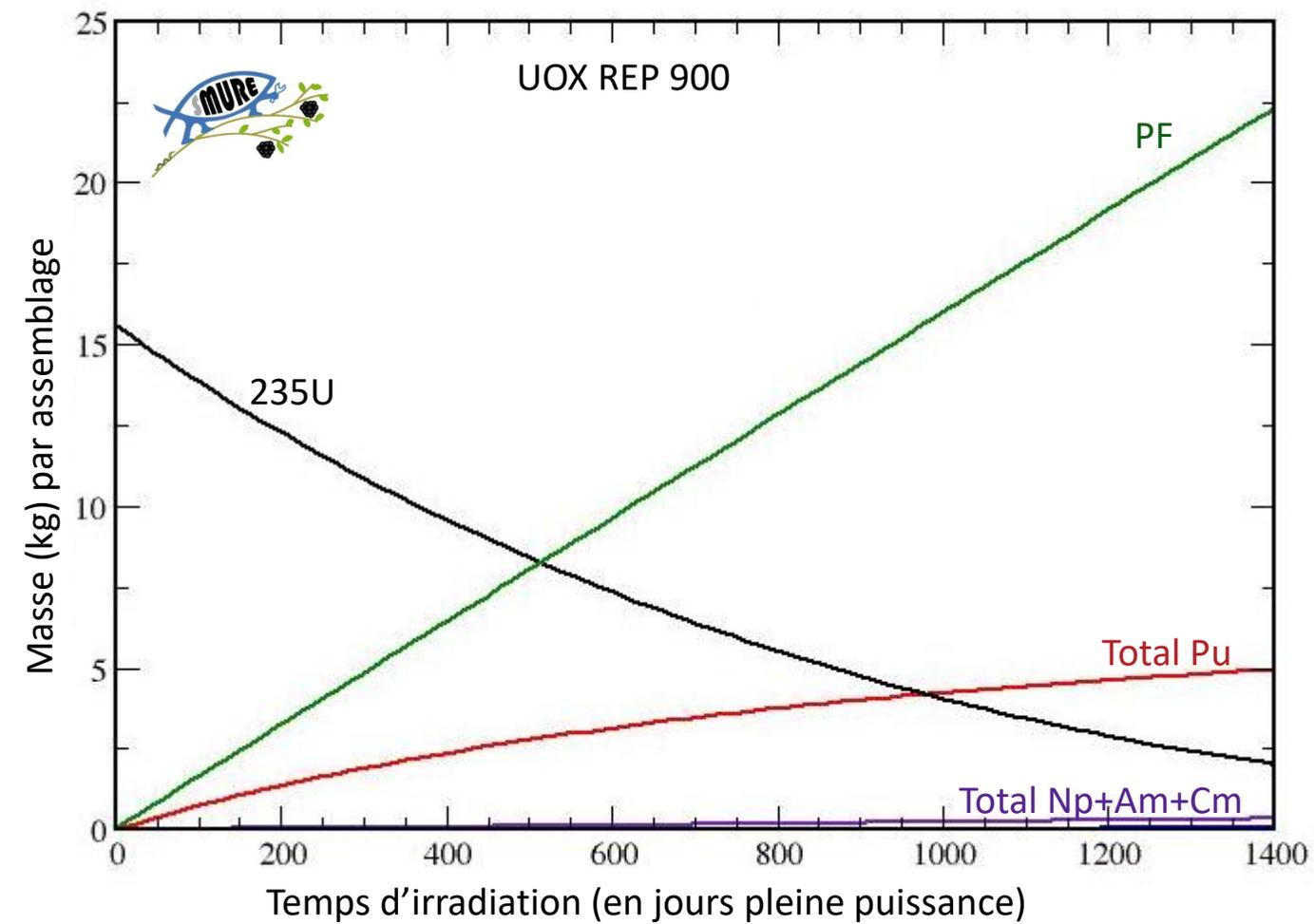
$$\frac{dN_i}{dt} = \underbrace{-\lambda_i N_i - N_i \sigma_{abs} \phi}_{\text{Disparition}} + \underbrace{\sum_{j \neq i} \lambda_{j \rightarrow i} N_j + N_j \sigma_{j \rightarrow i} \phi}_{\text{Production}}$$

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



## Partie 2 : Matière ou déchet ?

### Bilan matière d'un combustible UOX



➤ On distingue les actinides majeurs (U et Pu) des actinides mineurs (Np, Am, Cm et +...)

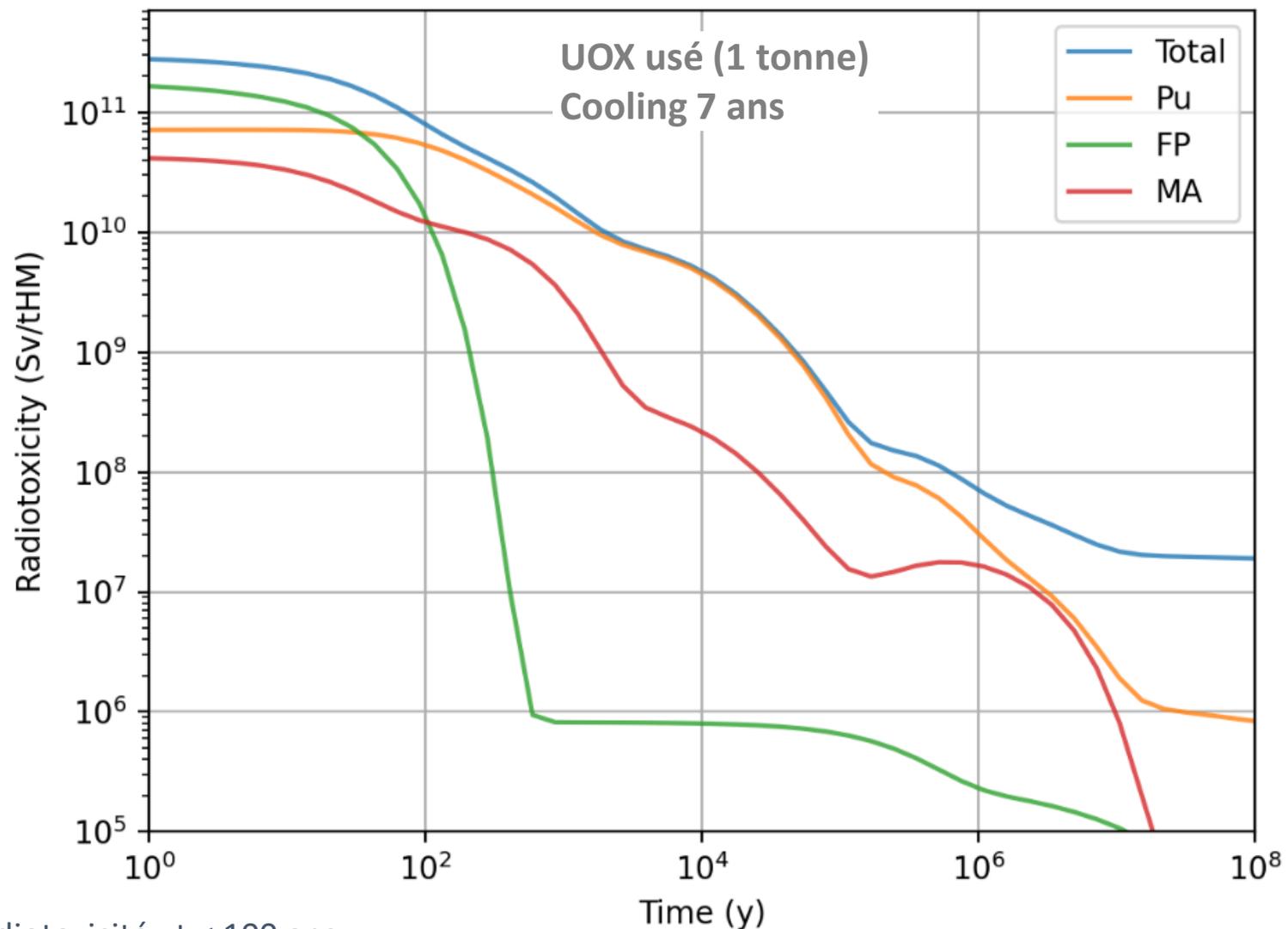
# Partie 2 : Matière ou déchet ?

## Toxicité d'un UOX usé



Bilans – TR 7 ans

	Masse	Activité	Pth
<b>Pu</b>	<b>1%</b>	<b>20,5%</b>	<b>10%</b>
<b><sup>235</sup>U</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>
<b><sup>238</sup>U</b>	<b>94%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>
<b>AM</b>	<b>0,1%</b>	<b>1%</b>	<b>12%</b>
<b>PF</b>	<b>5%</b>	<b>78,5%</b>	<b>78%</b>



- PF contributeur principal à l'activité, la puissance, la radiotoxicité : t < 100 ans
- Pu : 1<sup>er</sup> contributeur long terme ⇒ 1<sup>er</sup> élément à recycler
- AM : 2<sup>nd</sup> contributeur long terme

# Partie 2 : Matière ou déchet ?

## Une définition lourde de conséquences



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité

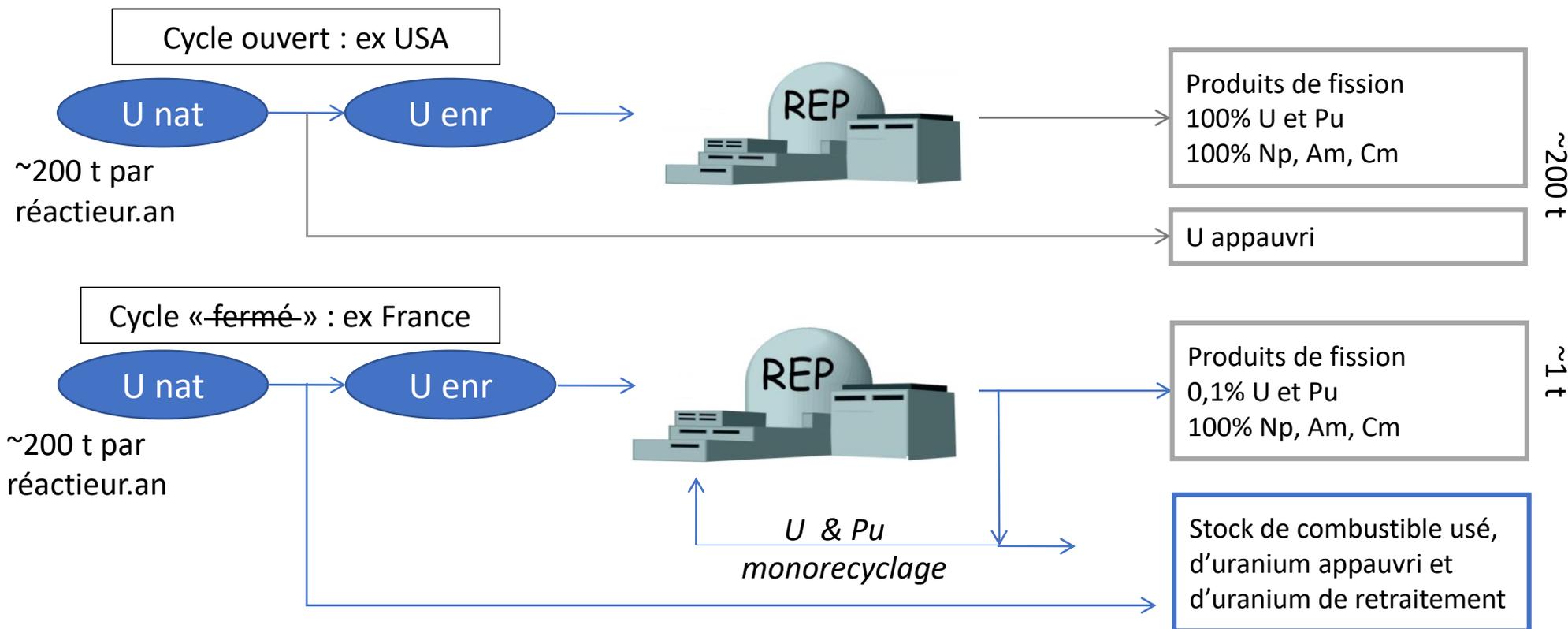
Légifrance

Le service public de la diffusion du droit

LOI n° 2006-739 du 28 juin 2006

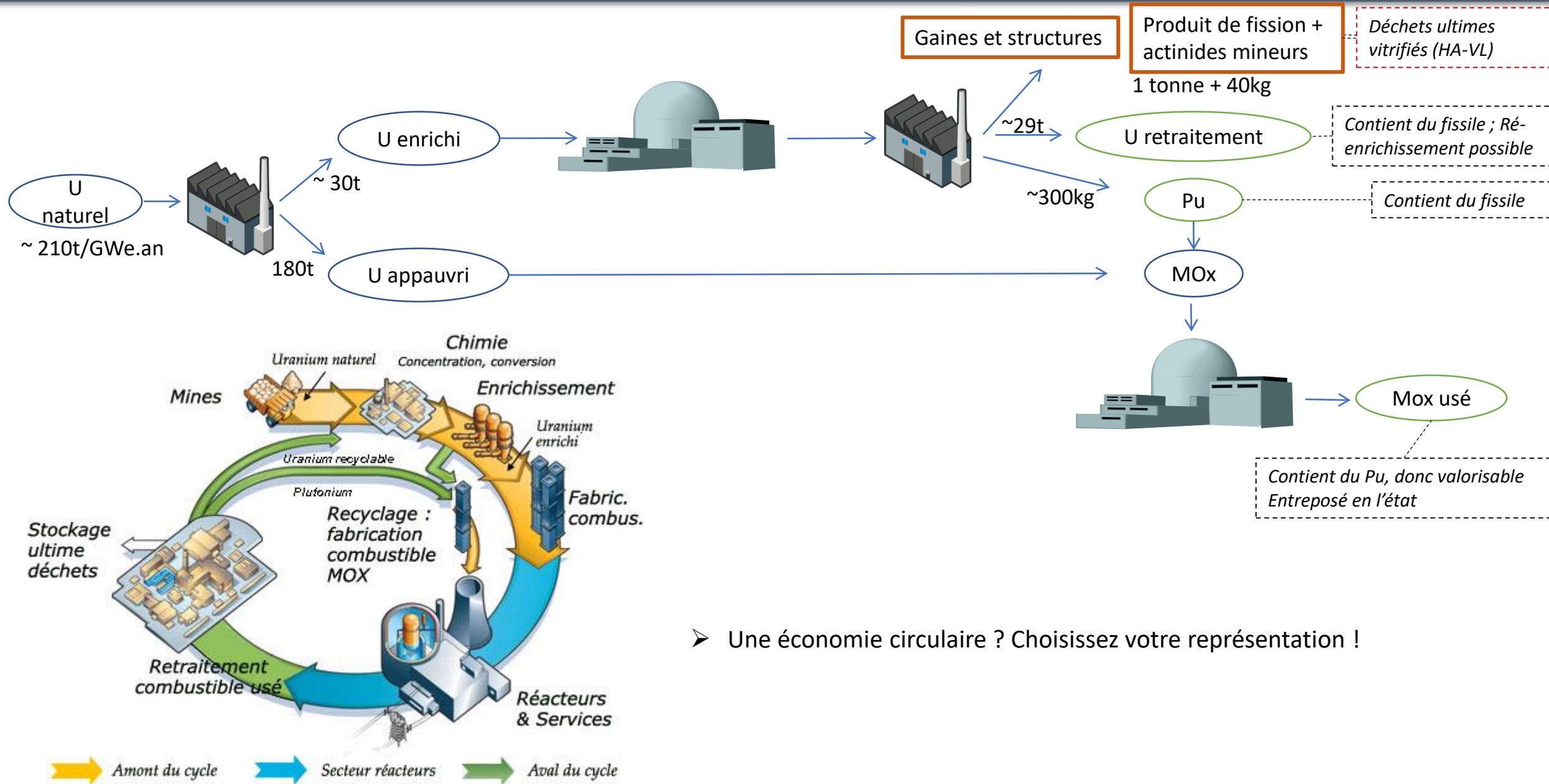
Article 5 : « Les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée »

→ Seuls les PF et les actinides mineurs des déchets



# Partie 2 : Matière ou déchet ?

## Le cycle du combustible Français



➤ Une économie circulaire ? Choisissez votre représentation !

## Partie 2 : Matière ou déchet ?

### La vitrification des déchets à la Hague (Cotentin)



Masse de verre d'un colis : 400 / 410 kg

Volume : ~180L

Puissance à la production < 3kW

Teneur en déchets : < 18.5 %<sub>mass</sub>

Entreposage des CSD dans des puits

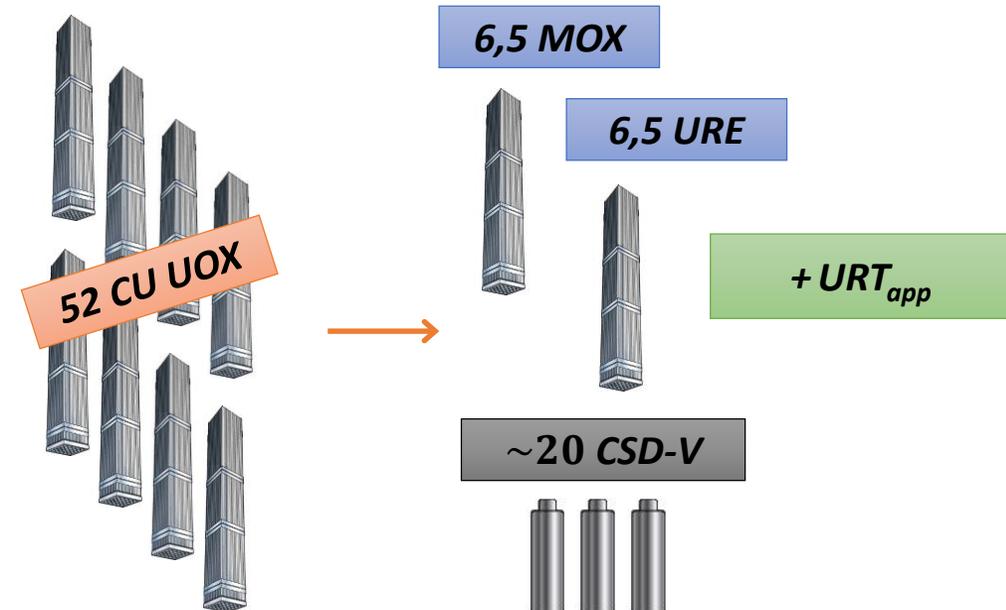


Entreposage des CU en piscine

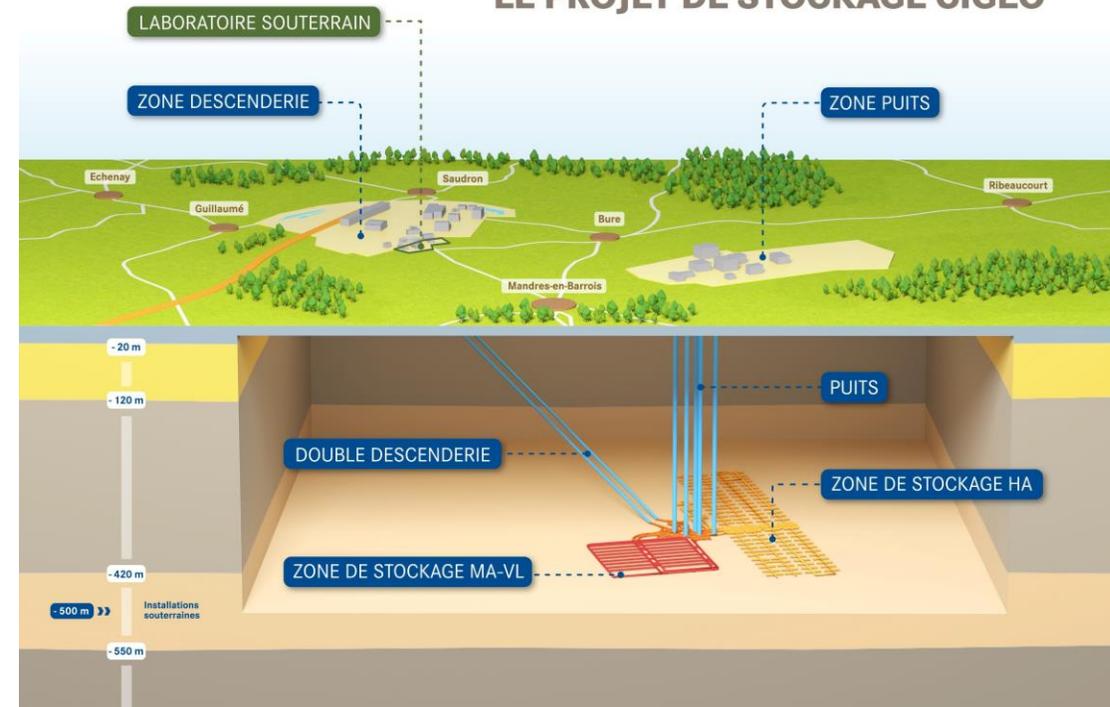


#### Intérêt de la stratégie Française :

- Economie d'U naturel (~10% MOX, ~25% MOX & URE)
- Réduction du nombre de combustible à «entrepoiser» (~ / 8)



#### LE PROJET DE STOCKAGE CIGÉO



#### L'inventaire de CIGEO :

	Déjà engagé*	Après 40 ans avec retraitement	Après 40 ans sans retraitement	Capacité CIGEO
HA-VL	5 700 m <sup>3</sup>	8 000 m <sup>3</sup>	93 500 m <sup>3</sup>	12 000 m <sup>3</sup>
MA-VL	57 500 m <sup>3</sup>	67 500 m <sup>3</sup>	59 000 m <sup>3</sup>	72 000 m <sup>3</sup>

\*déjà produit ou issu du traitement des futurs combustibles usés

- **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

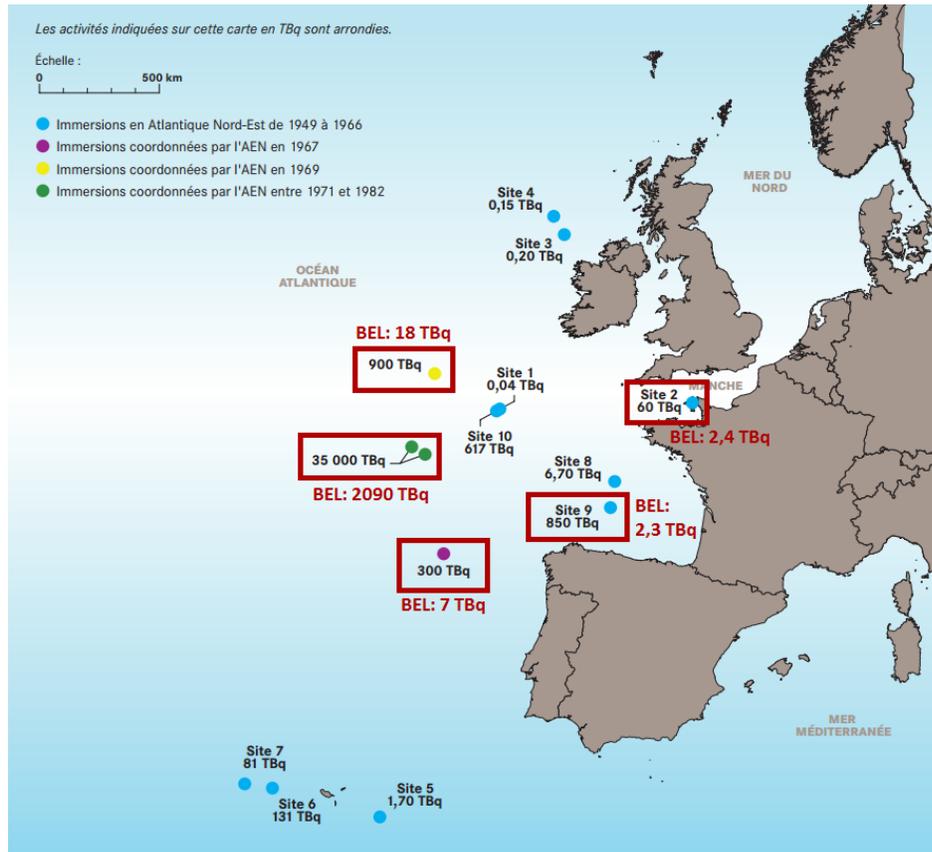
- 5% du total des déchets HA seront installés en 2025 dans CIGEO pour observation pendant 50 ans
- Le stockage des HA ne débutera donc pas avant 2075 !
- Après la phase d'exploitation, une phase de surveillance de 100 ans est planifiée (réversibilité)
- La surface totale représente environ 15 km<sup>2</sup> à terme

## Partie 2 : Matière ou déchet ?

### La gestion des déchets Haute Activité – Vie Longue

➤ 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*

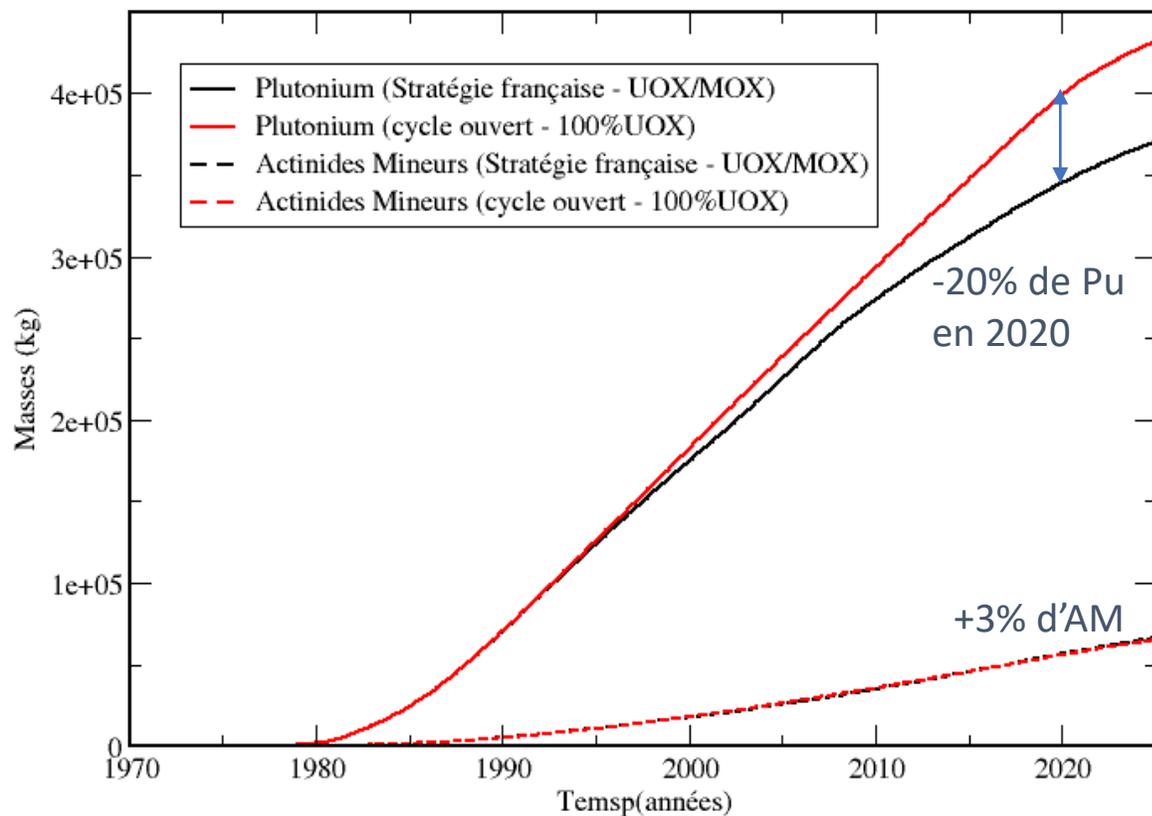


### ➤ MOX vs Cycle ouvert : Que gagne-t-on à remplacer 1 assemblage sur 8 par du MOX ?

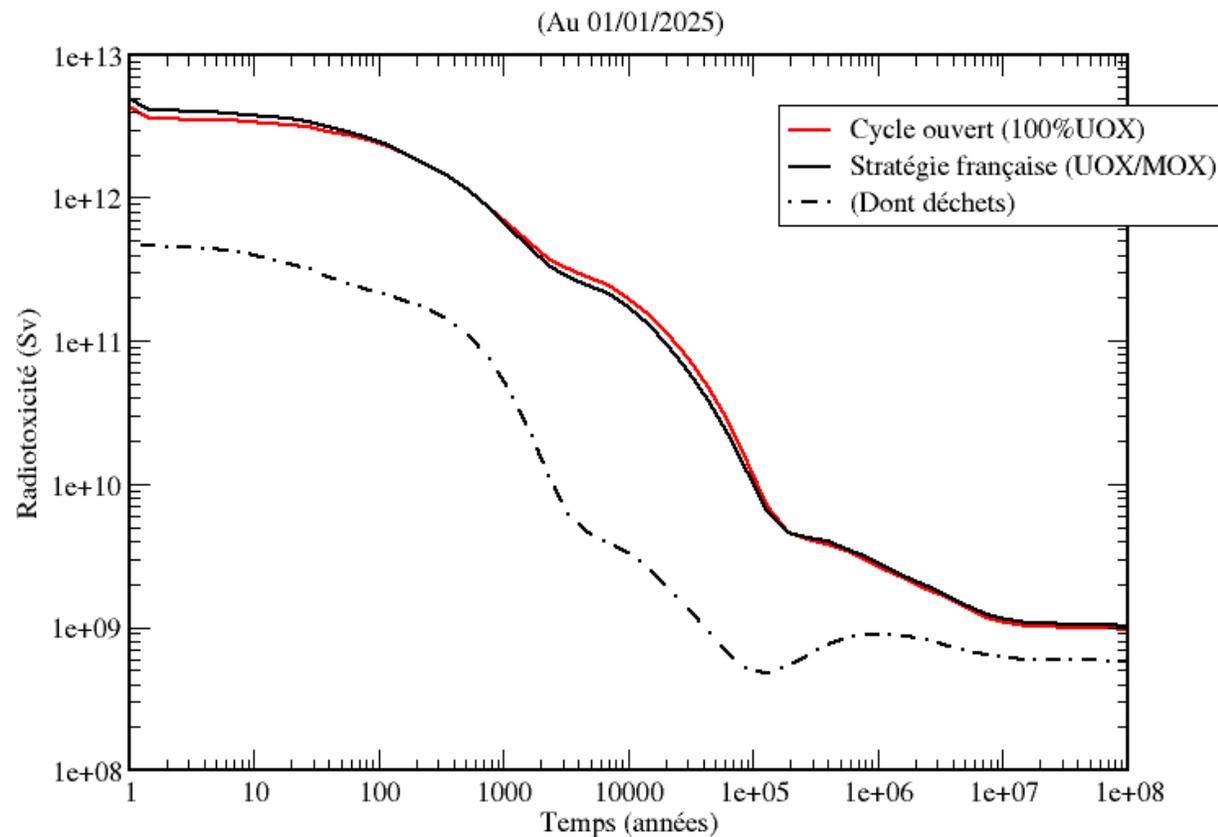
→ Simulation effectuée avec CLASS, code de physique du cycle développé par le CNRS



### Evolution des matières dans le parc français



### Radiotoxicité des matières et déchets pour le parc Français



- **L'irradiation de l'uranium produit des produits de fission, du plutonium et des actinides mineurs**
  - Les produits de fission sont les principaux contributeurs de la radioactivité jusqu'à 100 ans
  - Le plutonium est le premier contributeur long terme
  - Les actinides mineurs (américium et curium) sont majoritaire si le plutonium est considéré comme un déchet
- **La France met en œuvre le recyclage du plutonium et de l'uranium des UOX usés**
  - L'intérêt du MOX n'est pas la réduction de la toxicité de l'inventaire
  - L'utilisation du MOX permet de « concentrer » le plutonium dans les assemblages MOX usés (qui sont entreposé en l'état)
- **Le traitement/recyclage des UOX conduit à la production de déchets nucléaires de Haute Activité – Vie Longue**
  - Vitrifiés, ces déchets sont en attente du centre de stockage en couche géologique profonde à Bures

Que faire du plutonium des MOX usés ?

1. Physique des réacteurs 101 et sans équation
2. Matières ou déchets ?
3. Les ressources et la régénération du fissile
  1. L'économie possible dans le cycle actuel
  2. Les ressources mondiales
  3. La régénération = changement de technologie des réacteurs
  4. Pour aller plus loin : la transmutation des actinides mineurs
4. Retour sur les études de scénarios

LE RESTE POUR DEMAIN

# Energie(s) nucléaire(s) du futur

–

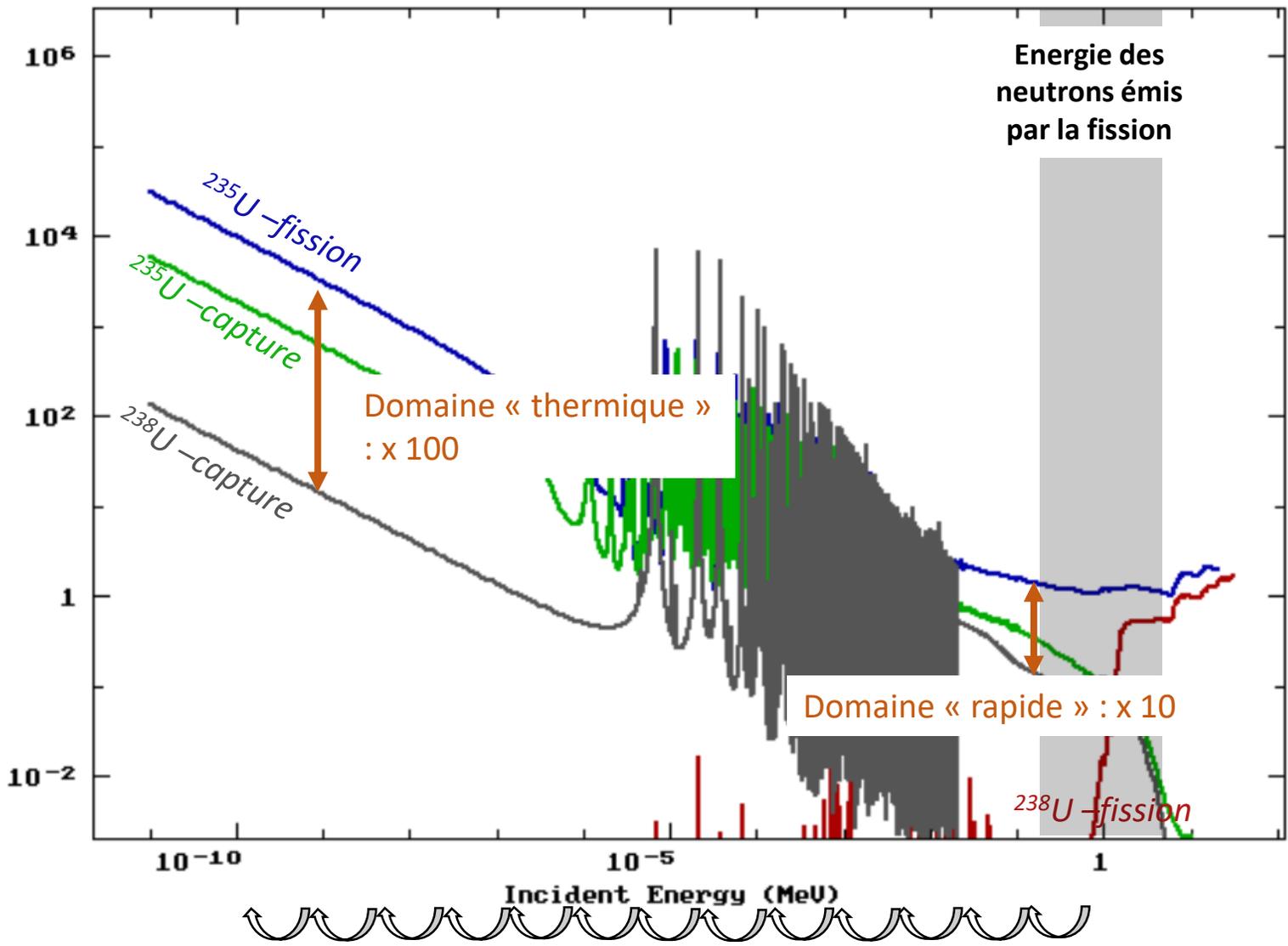
*Les enjeux de recherches et l'intérêt d'une approche académique*

Partie 2

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

**Promotion Enrico Fermi & David Hilbert**

*1<sup>er</sup> - 11 juillet 2024*



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

$$k_{\text{eff}} = \frac{\nu N_{\text{fissile}} \sigma_{\text{fission}} \phi}{\sum_{\text{isotopes}} N_i \sigma_{\text{absorption}}^i \phi}$$

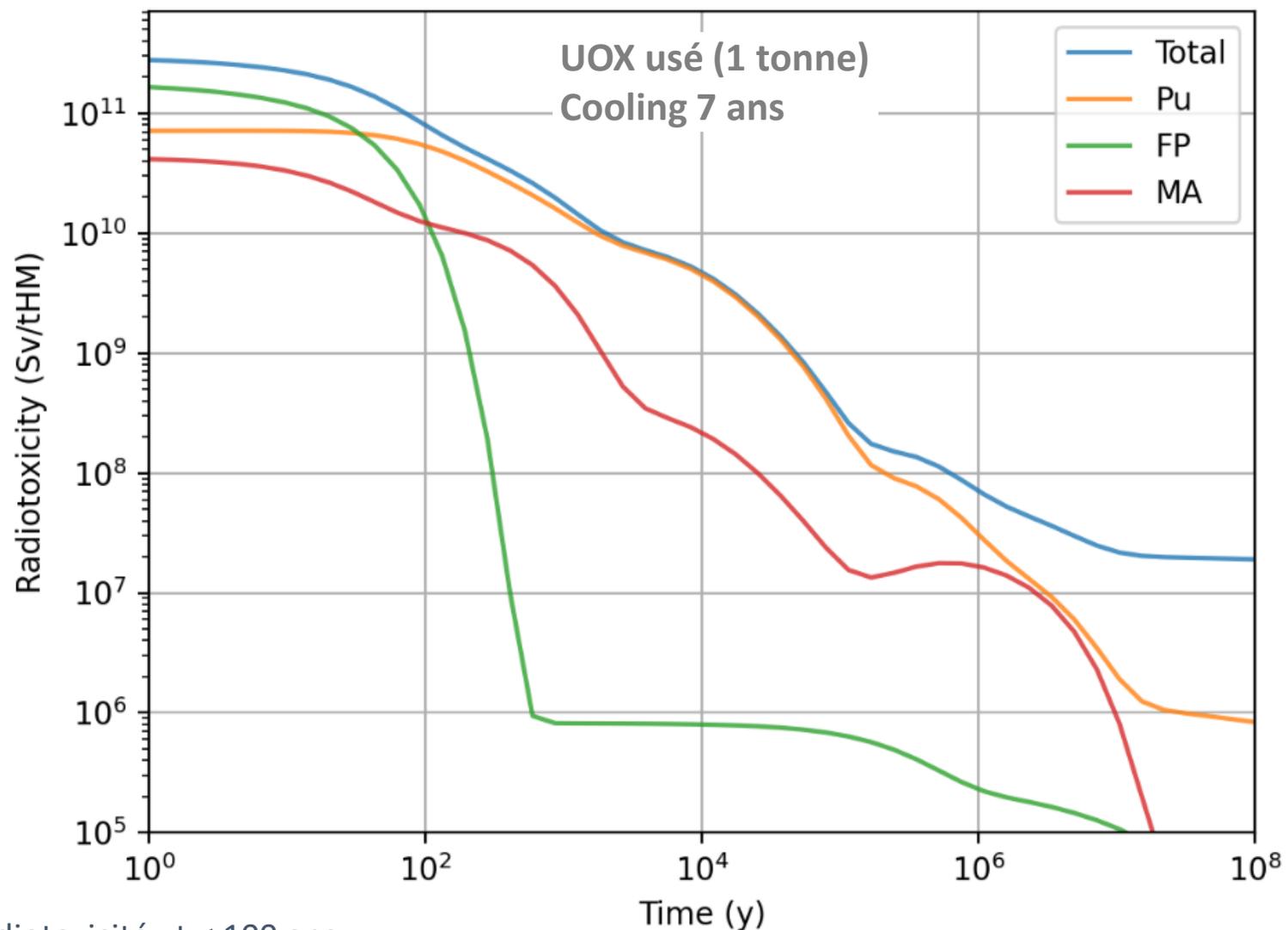
- Pour avoir  $k_{\text{eff}} > 1$ , les neutrons sont ralentis (par choc élastique sur des noyaux « légers »)
- Pour augmenter la probabilité de fission, la concentration de noyaux fissiles peut être augmenté (**enrichissement**)
  - 0,7% pour l'uranium naturel
  - 3-5% pour les UOX

## Quelques rappels ?



Bilans – TR 7 ans

	Masse	Activité	Pth
<b>Pu</b>	<b>1%</b>	<b>20,5%</b>	<b>10%</b>
<b><sup>235</sup>U</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>
<b><sup>238</sup>U</b>	<b>94%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>
<b>AM</b>	<b>0,1%</b>	<b>1%</b>	<b>12%</b>
<b>PF</b>	<b>5%</b>	<b>78,5%</b>	<b>78%</b>

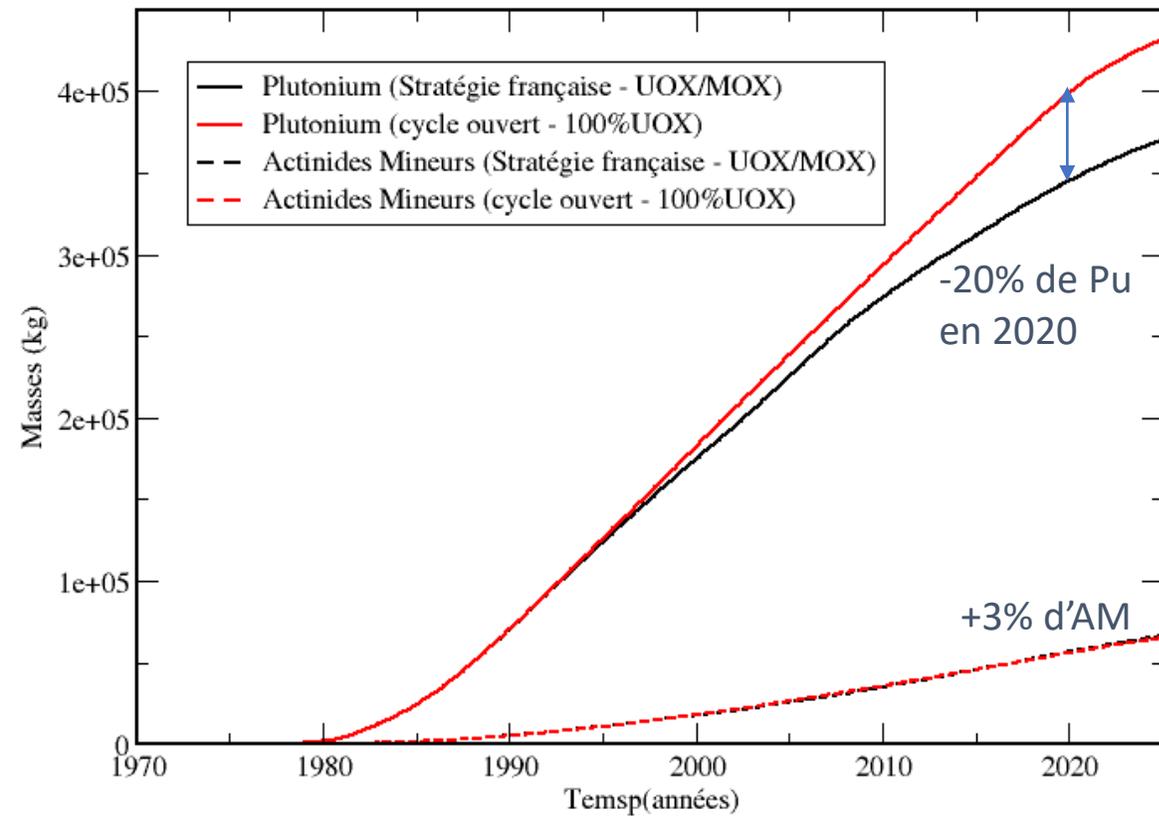


- PF contributeur principal à l'activité, la puissance, la radiotoxicité :  $t < 100$  ans
- Pu : 1<sup>er</sup> contributeur long terme ⇒ 1<sup>er</sup> élément à recycler
- AM : 2<sup>nd</sup> contributeur long terme

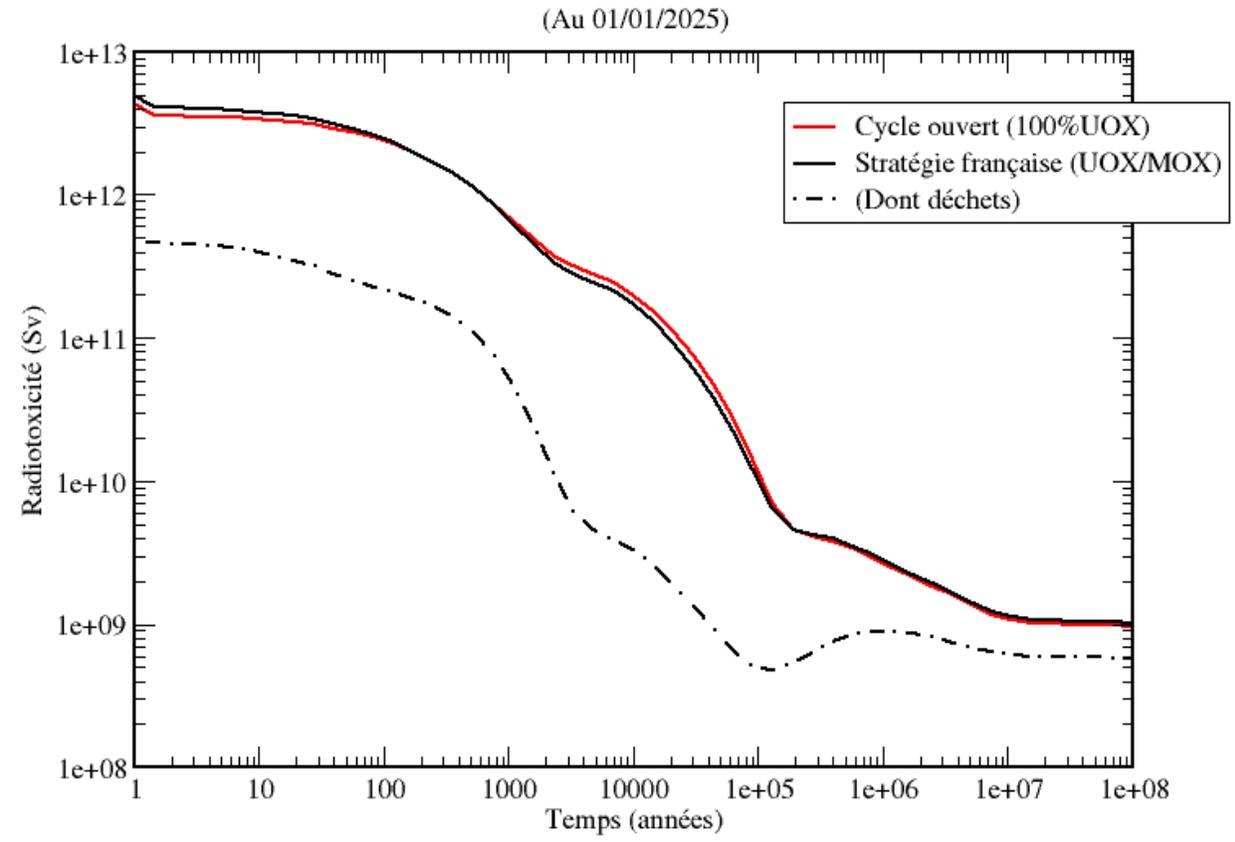
- **MOX vs Cycle ouvert** : Que gagne-t-on à remplacer 1 assemblage sur 8 par du MOX ?  
→ Simulation effectuée avec CLASS, code de physique du cycle développé par le CNRS



### Evolution des matières dans le parc français



### Radiotoxicité des matières et déchets pour le parc Français



## 1. Physique des réacteurs 101

1. Energie nucléaire = énergie de masse ?
2. La fission et la réaction en chaîne
3. Interaction neutron/matière
4. Modération des neutrons et réacteurs à neutrons thermiques

## 2. Matières ou déchets ?

1. L'évolution du combustible pendant l'irradiation
2. Définition des déchets et conséquences
3. La gestion des déchets Haute-Activité à Vie Longue : CIGEO
4. L'impact du mono-recyclage du plutonium sur l'inventaire radiotoxique

## 3. Les ressources et la régénération du fissile

1. L'économie possible dans le cycle actuel
2. Les ressources mondiales
3. La régénération = changement de technologie des réacteurs
4. Pour aller plus loin : la transmutation des actinides mineurs

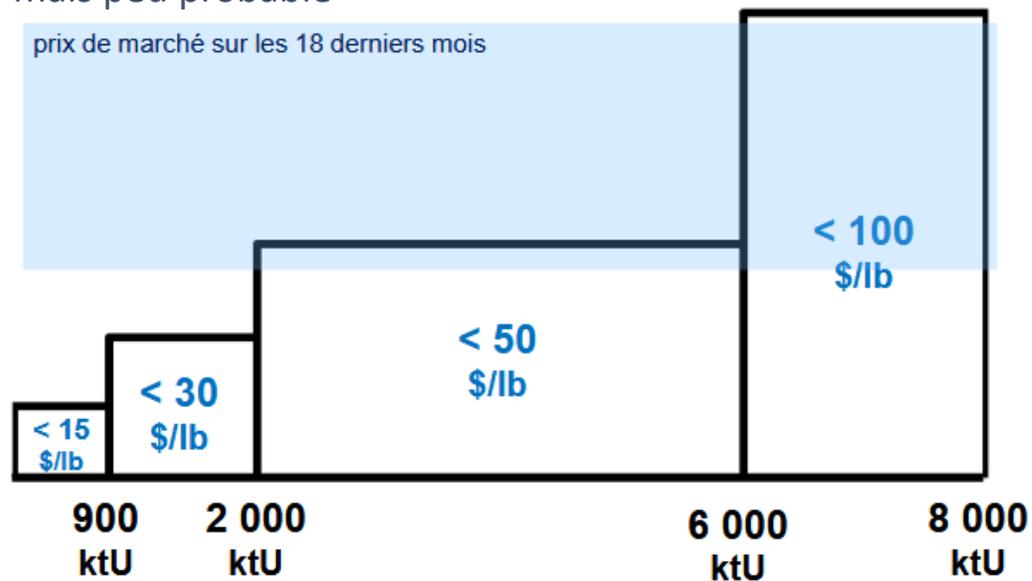
## 4. Retour sur les études de scénarios

1. Quelques définitions liés aux scénarios
2. Les scénarios « de référence »
3. La place des AMR dans le mix énergétique

## Partie 3 : Les ressources et la régénération

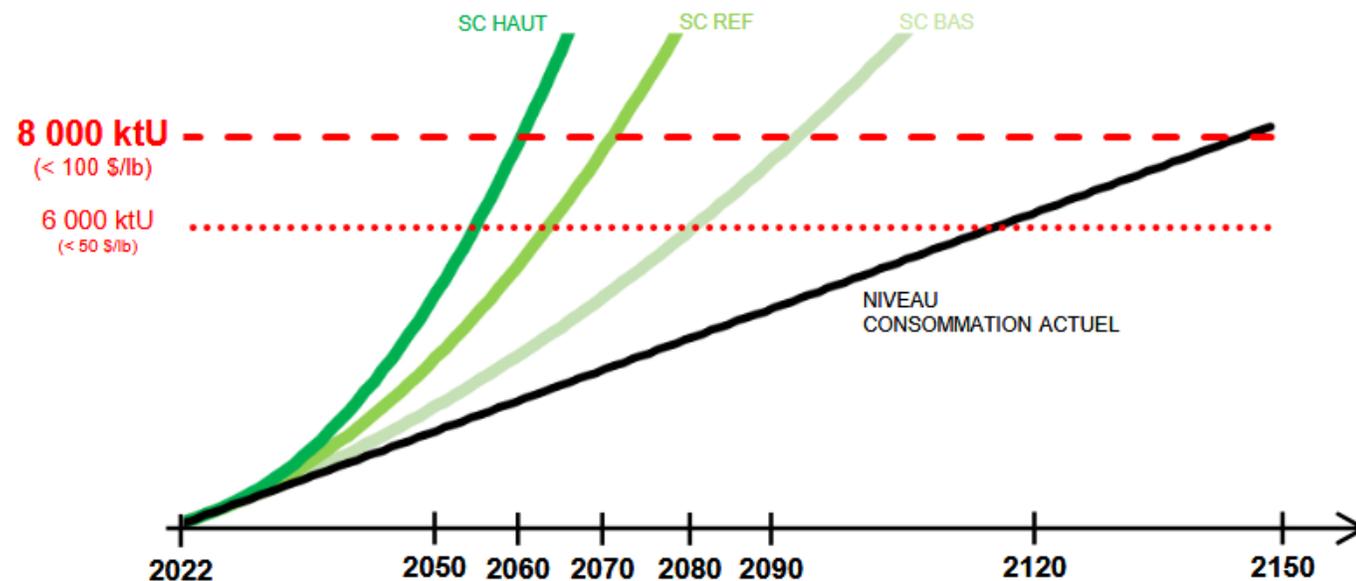
### Doit-on craindre une pénurie d'uranium ?

- Jérôme Garrel (EDF) : « Les ressources en uranium sont abondantes, une rareté est possible avant la fin du siècle suivant les scénarios mais peu probable »



**Ressources mondiales en uranium**

(« reasonably assured » & « inferred »)



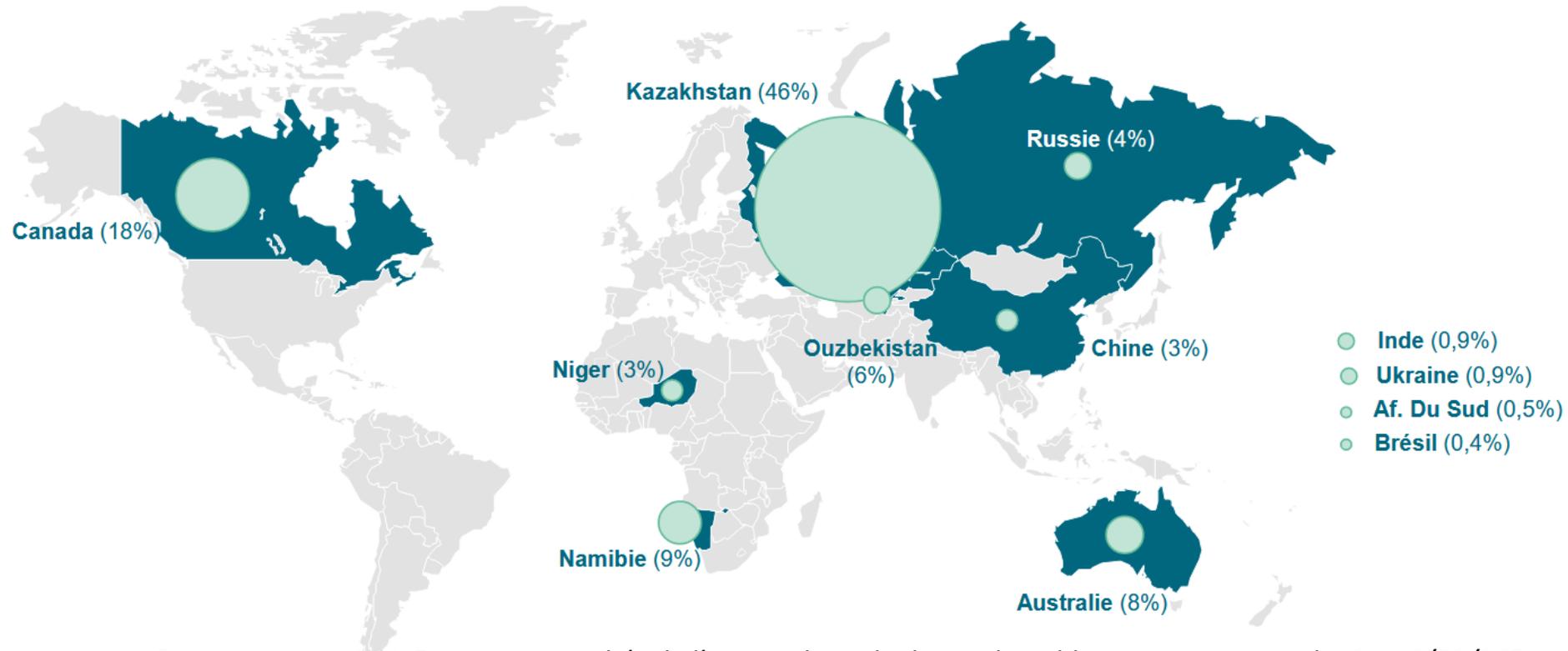
**Consommation cumulée d'uranium, au niveau mondial**

Source images : J. Garrel, « Défis et ambitions pour le cycle nucléaire du futur » CNE 8/02/2024

- Processus déclaratif des ressources auprès de l'AIEA : **livre rouge de 2020 > 16 millions de tonnes déclarées**

« 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)

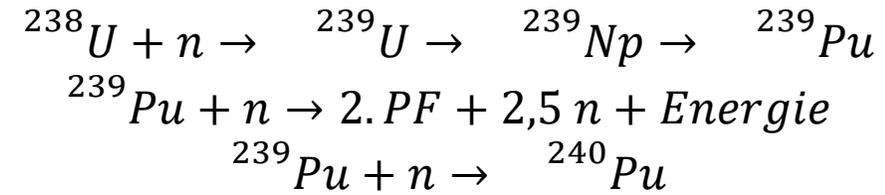
#### Projections de répartition des principaux producteurs d'uranium en 2024 (%)



Source image : P. Monin, « Les marchés de l'amont du cycle du combustible : uranium naturel » CNE 8/02/2024

- Un **marché « restreint »** et fortement impacté par la géopolitique
  - Une zone d'influence Chinoise, une seconde d'influence russe et une troisième EU + Europe
- Grosses **incertitudes** sur l'**accès aux mines** dans le futur
  - Les besoins affichés des réacteurs chinois ne sont actuellement pas pourvu
  - Crise de l'uranium à anticiper d'ici la fin du siècle

- Comment optimiser la production de plutonium ?
  - Produire le fissile au fur et à mesure de sa disparition



- Le bilan neutronique est plus tendu :

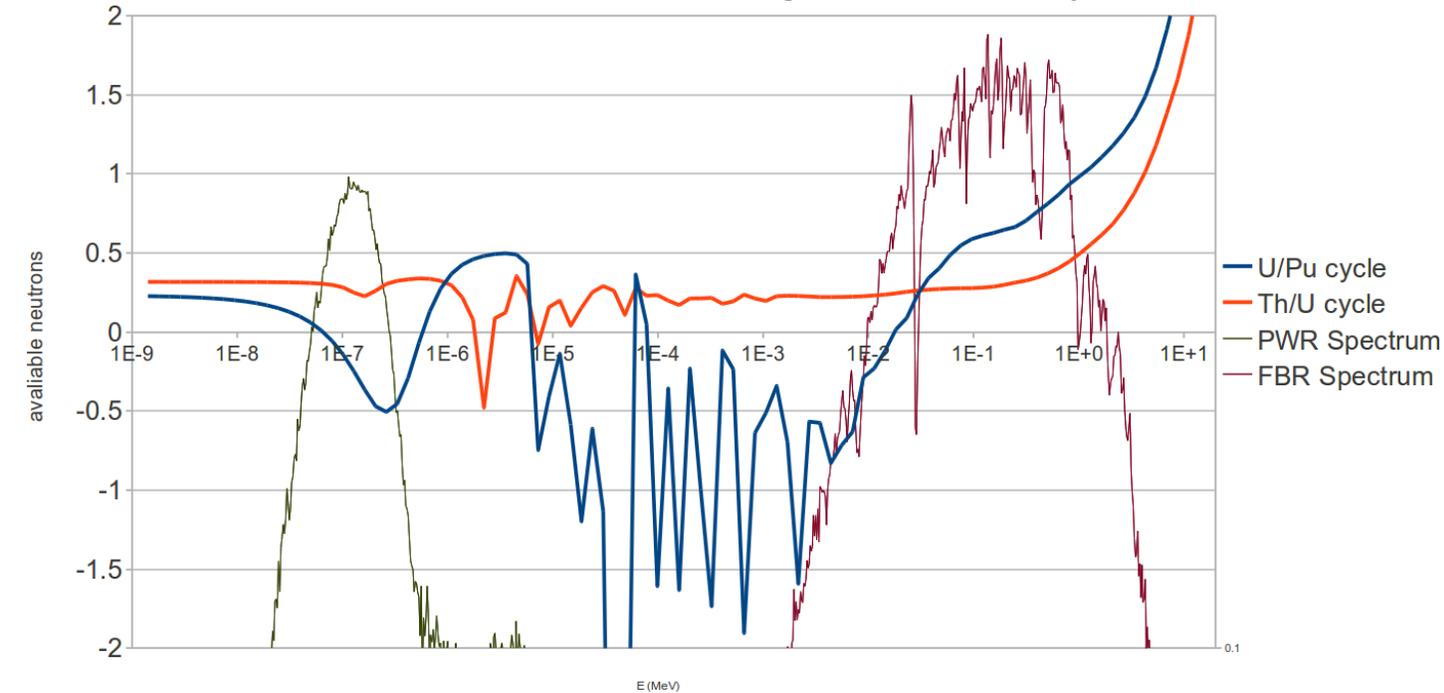
Production des neutrons	Disparitions des neutrons
$\nu \times \text{Nombre de fission du } {}^{239}\text{Pu}$	$\begin{aligned}  &\text{Nombre de réaction sur le } {}^{239}\text{Pu} \\  &+ \\  &\text{Nombre de capture } {}^{238}\text{U} \text{ pour reproduire} \\  &\text{les } {}^{239}\text{Pu} \text{ qui ont disparus} \\  &+ \\  &\text{Nombre de réactions sur les autres noyaux} \\  &+ \\  &\text{fuites}  \end{aligned}$

- Comment optimiser la production de plutonium ?
  - ➔ Produire le fissile au fur et à mesure de sa disparition

Production des neutrons	Disparitions des neutrons
$\nu$	$1 + \sigma_c/\sigma_f$
	$1 + \sigma_c/\sigma_f$

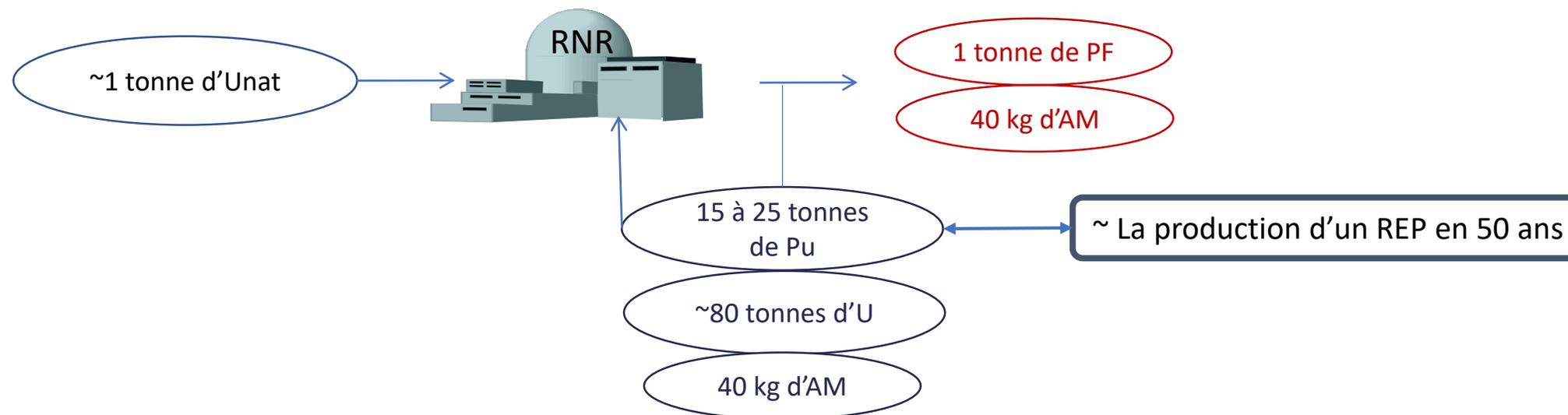
$$\text{Nombre de neutrons disponibles} = \nu - 2\left(1 + \frac{\sigma_c}{\sigma_f}\right)$$

Available neutron after breeding in U/Pu et Th/U cycle



- Les sections efficaces ne permettent **pas la régénération** du  $^{239}\text{Pu}$  en réacteurs **thermiques**
- La **régénération** est possible en **spectre rapide** (*un noyau de  $^{239}\text{Pu}$  apparaît à chaque fois qu'un noyau de  $^{239}\text{Pu}$  disparaît*)
  - ➔ On ne souhaite plus ralentir les neutrons
  - ➔ **Conséquence** : nécessité d'une **concentration** de fissile plus **importante** qu'en REP

- Les réacteurs à neutrons rapides imposent une proportion de fissile plus élevée : entre 15 à 30 % de Pu dans un combustible à neutrons rapides  
→ « La taille des noyaux fissiles vue par les neutrons est moins favorable »



- Si le nucléaire se développe, le plutonium est une matière précieuse à économiser (pour une utilisation tardive)
- Se les RNR ne se développent pas, le plutonium est alors le déchet majoritaire !

**Incertitude forte sur le long terme mais  
nécessité d'anticiper très en amont**

- Après le recyclage du plutonium, il est possible d'envisager le recyclage des actinides mineurs  
→ Stratégie de transmutation

### ➤ Dans un REP : l'eau « modère » les neutrons ET refroidit le cœur

→ Quel caloporteur en remplacement ?

- **Un refroidissement efficace**  
Capacité calorifique, densité
- **Un ralentissement des neutrons minimal**  
Section efficace de diffusion faible (probabilité de réaction)  
Noyaux lourds pour minimiser la perte d'énergie  
Moins de matière possible

→ Métaux liquides :

- Plomb : BREST, MYRRHA
  - ❑ Poids + Production de Po + corrosion
- Sodium : RAPSODIE, PHENIX, Super-PHENIX, ASTRID, EBR II, BN600,...
  - ❑ Réactivité chimique avec l'air et l'eau + corrosion

→ Superphénix (couplé au réseau en 1986 ; définitivement fermé en 1997)

- Comment charger le réacteur ? Comment contrôler la tuyauterie primaire ?
- Quel comportement accidentel ?

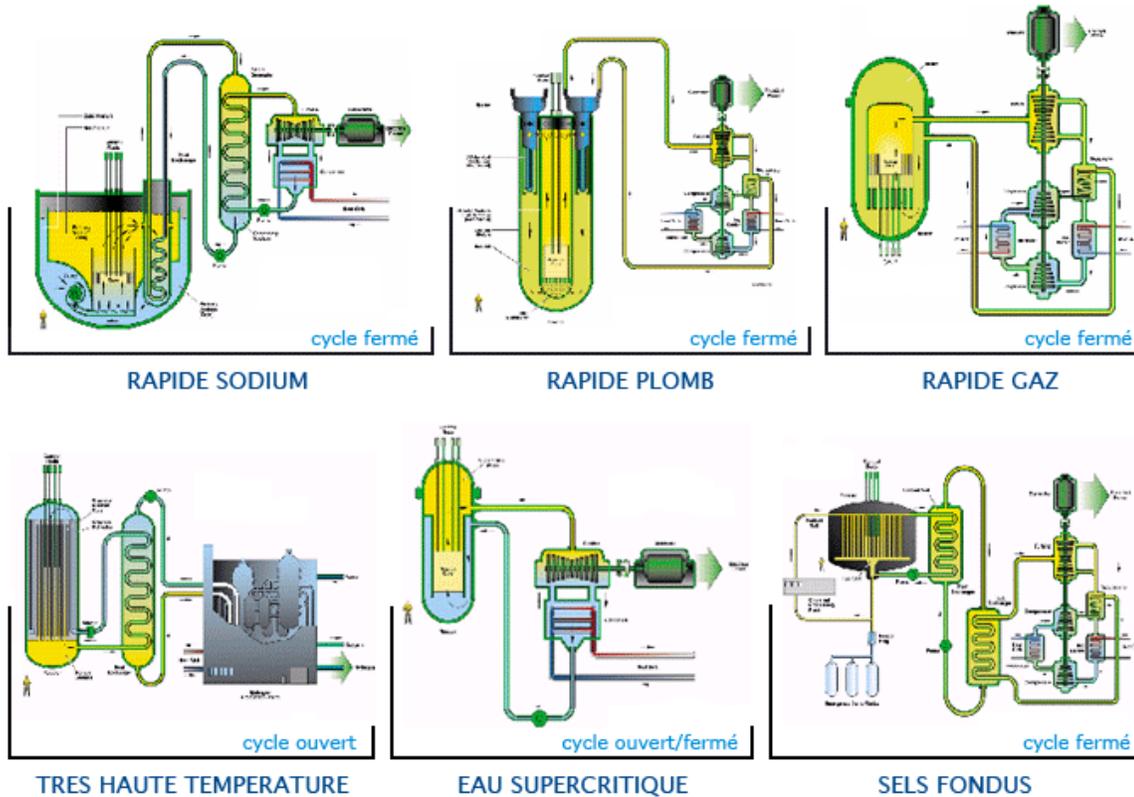


- **Génération 4 : Forum international pour instaurer une coopération internationale pour le développement des réacteurs du futur**  
→ Créé en 2001

- Améliorer la sûreté nucléaire
- Améliorer la résistance à la prolifération
- Minimiser la production de déchets
- Optimiser l'utilisation des ressources naturelles
- Diminuer les coûts de construction et d'exploitation



6 CONCEPTS INNOVANTS



Réacteurs rapides sodium



Réacteurs rapides à Sels Fondus



Réacteurs rapides au plomb

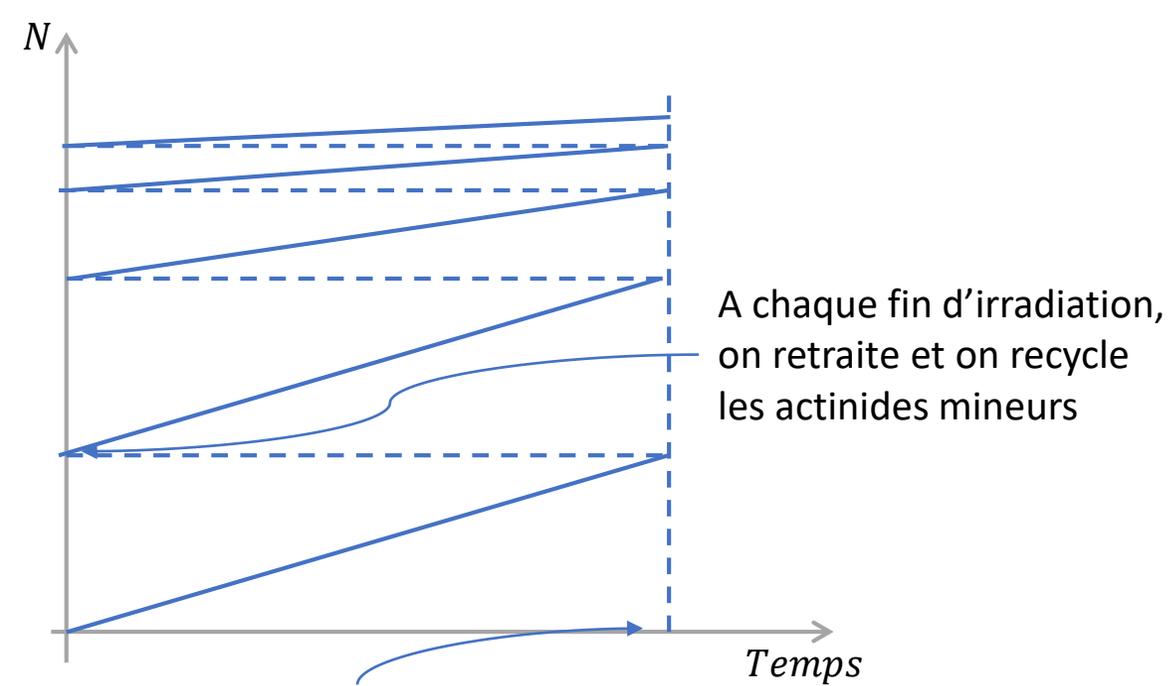


Réacteurs très haute température

# Partie 3 : Les ressources et la régénération

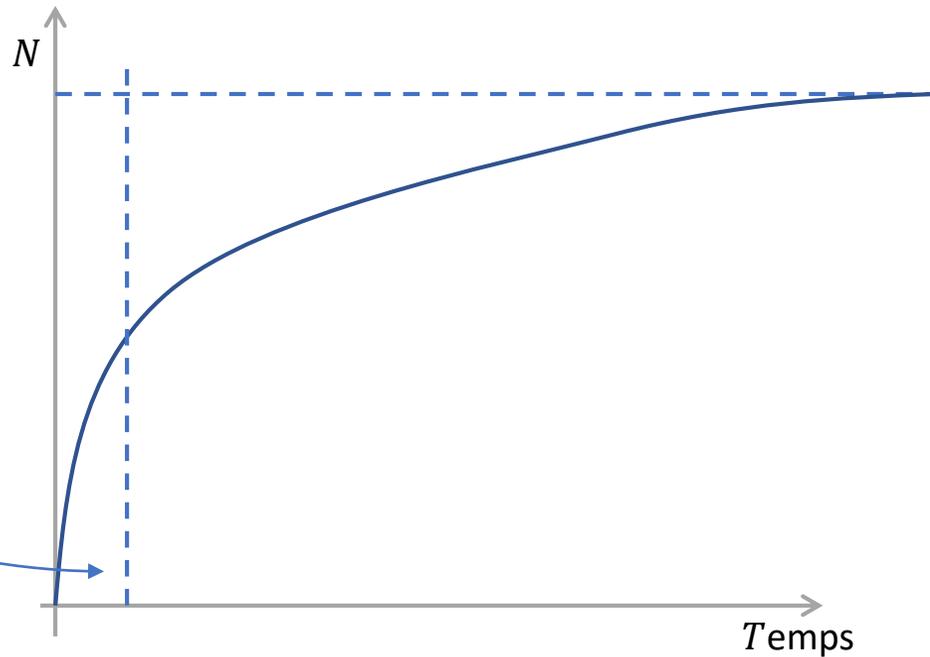
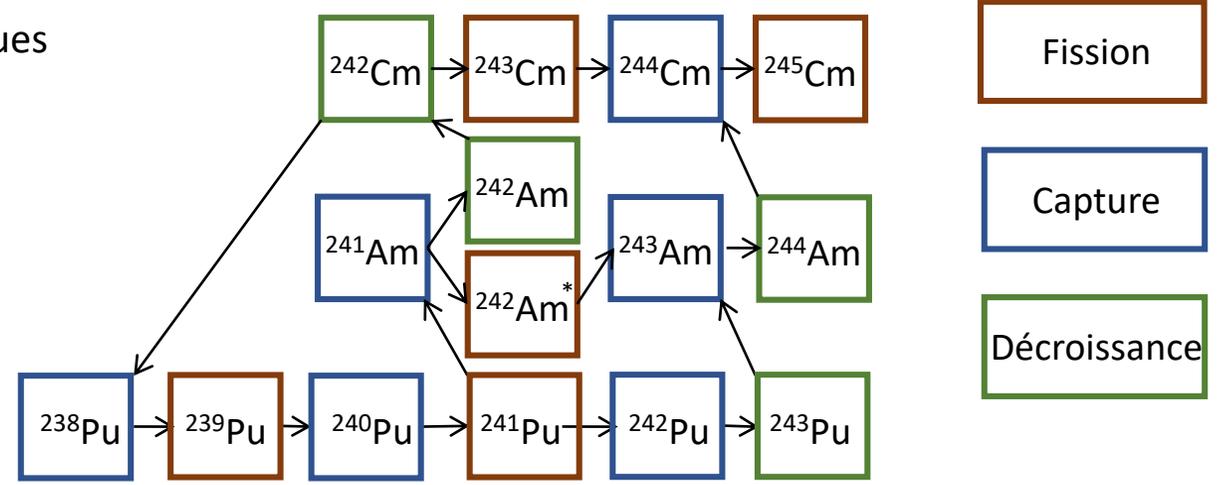
## La transmutation

➤ On force la fission des actinides mineurs après captures neutroniques



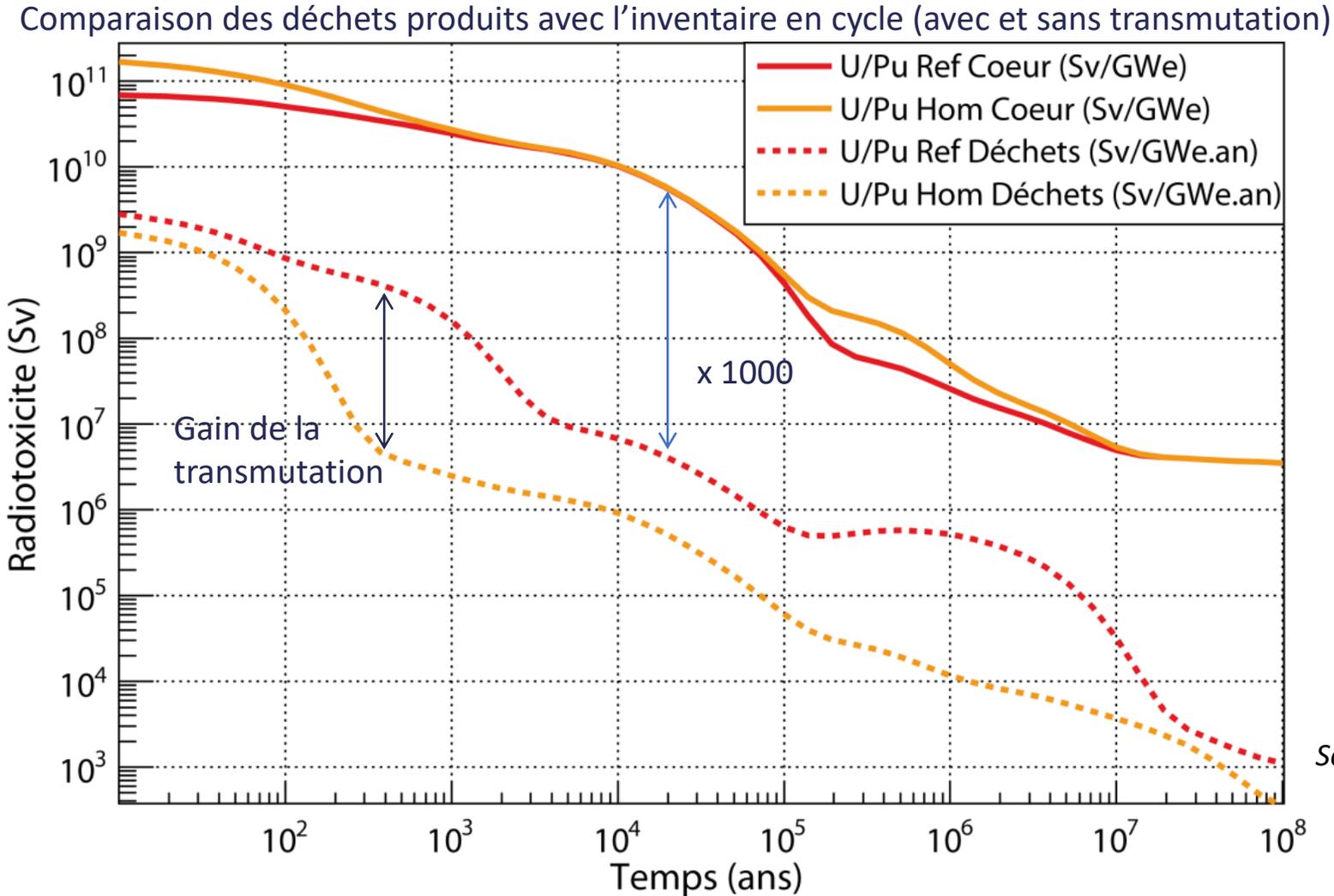
A chaque fin d'irradiation, on retire et on recycle les actinides mineurs

Temps entre deux rechargements



**Il faut du temps pour espérer un effet sur les inventaires**  
→ On produit TOUJOURS des déchets nucléaires

- La transmutation des actinides mineurs a un sens au niveau du cycle si et seulement si le plutonium est multi-recyclé
- Les déchets sont alors une toute petite partie de la radiotoxicité des matières !



Source : J. Brizi, thèse de doctorat

- **La régénération du fissile permet de *découpler* la production d'énergie de la question des déchets et de la ressources**
    - Associée à une stratégie de transmutation, on optimise *du point de vue des matières* le potentiel énergétique de l'uranium
  - **Le plutonium est alors « stabilisé » dans le cycle**
    - Indépendance énergétique...
    - ... qui impose de gérer des inventaires de matières radiotoxiques (très) important
    - Importance des stratégies de « fin de jeu »
      - Incinérer le plutonium dans des réacteurs dédiés pour réduire son inventaire*
  - Quintessence de la promesse du nucléaire
    - *Une énergie propre, pas cher, partout et sans contrainte*
- 
1. Physique des réacteurs 101 et sans équation
  2. Matières ou déchets ?
  3. Les ressources et la régénération du fissile
  4. Retour sur les études de scénarios
    1. Quelques définitions liés aux scénarios
    2. Les scénarios « de référence »
    3. La place des AMR dans le mix énergétique

## Partie 4 : Retour sur les scénarios nucléaires

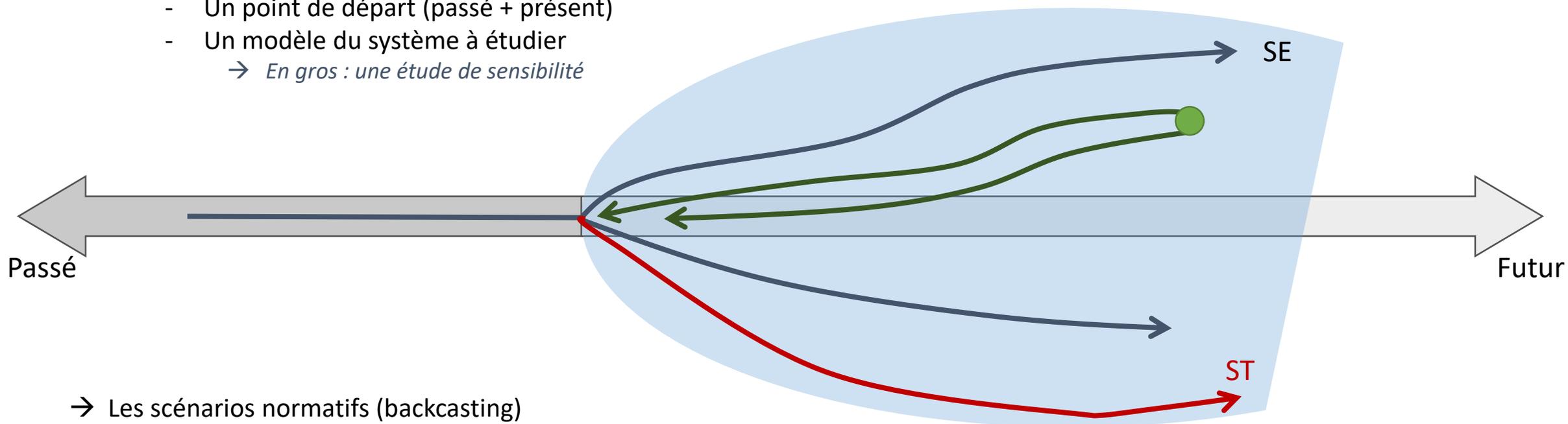
### L'intérêt des études prospectives

- Un scénario est une histoire, lié à un cadre temporelle et géographique qui permet de modéliser des systèmes complexes pour discuter **des hypothèses**
  - Il est un objet de communication dans les discussions publiques

- Deux approches très différentes :

- Les scénarios exploratoires (forecasting)

- Un point de départ (passé + présent)
- Un modèle du système à étudier
  - En gros : une étude de sensibilité



- Les scénarios normatifs (backcasting)

- Un objectif dans le futur (défini comme un objectif désiré)
- Identifier les chemins possibles pour atteindre cet objectif (à partir du présent)

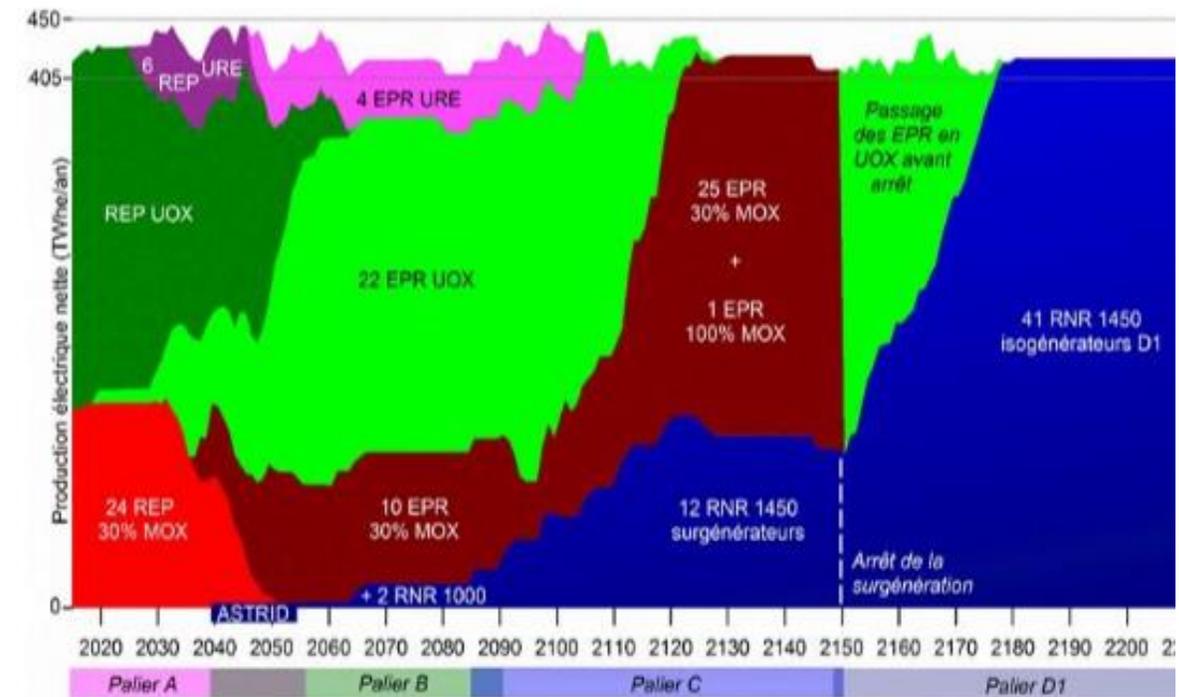
- Attention, confondre les deux approches c'est souvent confondre résultats et hypothèses :

- A comparer avec un scénario « tendanciel » : reconnu comme le scénario de référence

# Partie 4 : Retour sur les scénarios nucléaires

## Les scénarios nucléaires (*normatifs*) et leurs évolutions historiques

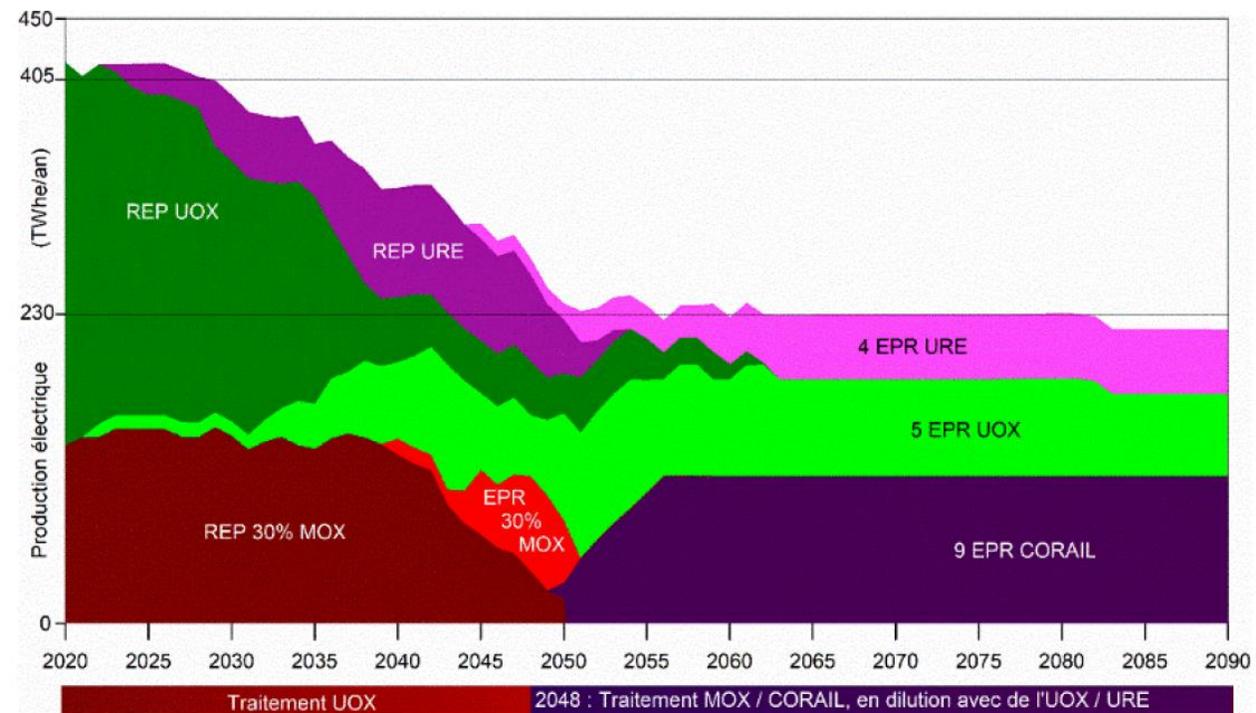
- Avant 2018 : maintien de la puissance nucléaire et un déploiement des RNR de type RNR-Na



*Prospective inventory of radioactive materials and waste produced by the french nuclear fleet according to various options, Chabert et al. 2018*

- Objectif : « fermer » le cycle avant la fin du siècle  
→ Résultats : on manque de Pu

- 2019 : Abandon du projet ASTRID  
→ On réduit l'horizon temporel et on « valorise » le plutonium dans les REP



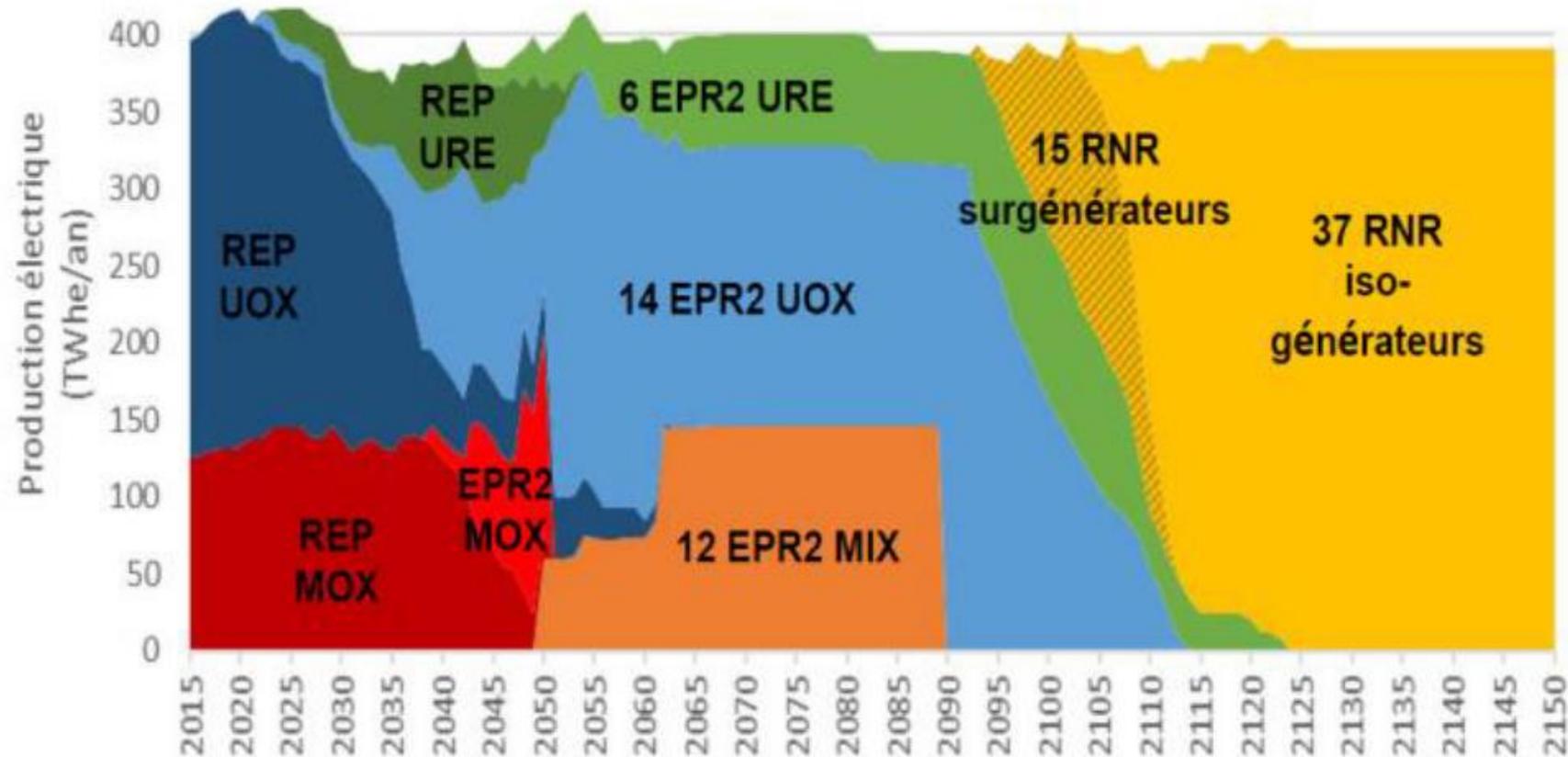
*Etude de scénarios : gestion des matières et flux de déchets, Chabert et al. CNE- 10/02/2021*

- Objectif : stabilisation de l'inventaire en plutonium via le multi-recyclage du plutonium en REP

## Partie 4 : Retour sur les scénarios nucléaires

### Les scénarios nucléaires (*normatifs*) et leurs évolutions historiques

- En 2022 : on revient à la hausse
  - Avec un horizon temporel toujours aussi arbitraire qui conditionne les résultats



Etude de transition : MRREP et transition vers les RNR, Chabert et al. CNE- 09/02/2022

**La compétition entre PWR et RNR est difficile à comprendre**

→ La limitation de l'approvisionnement en Uranium ne veut pas dire plus d'approvisionnement

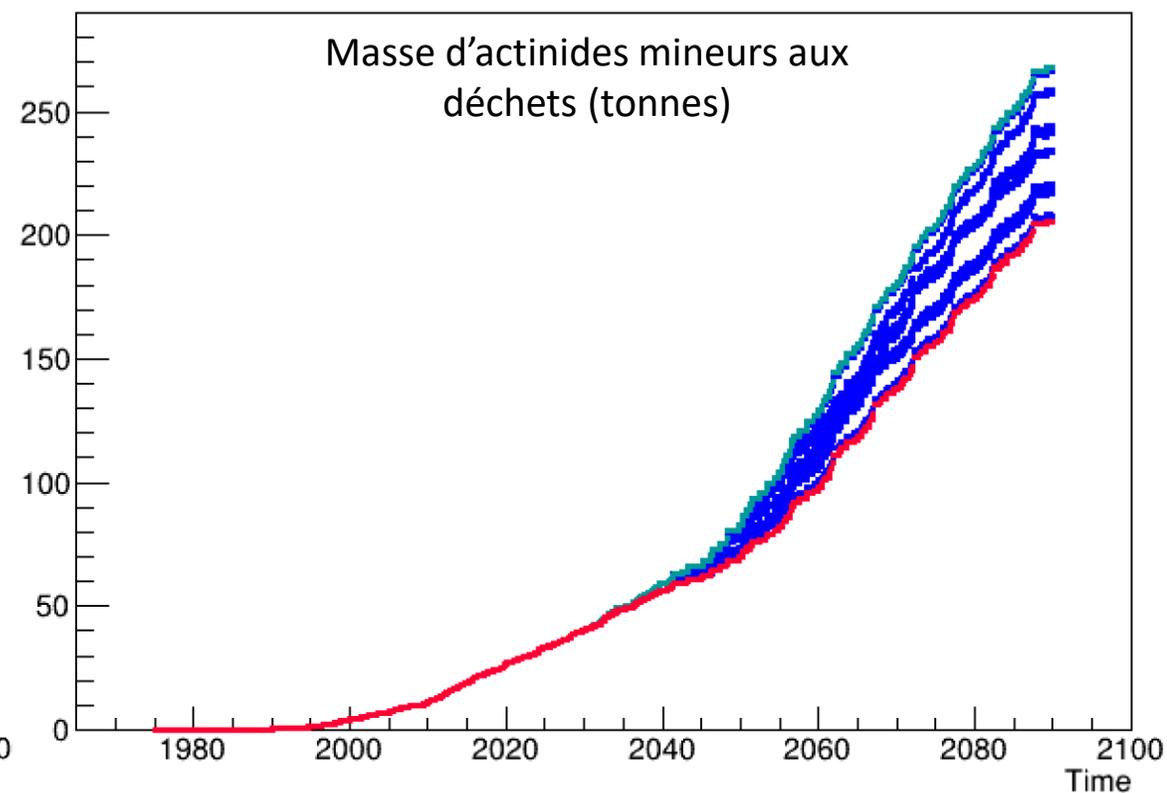
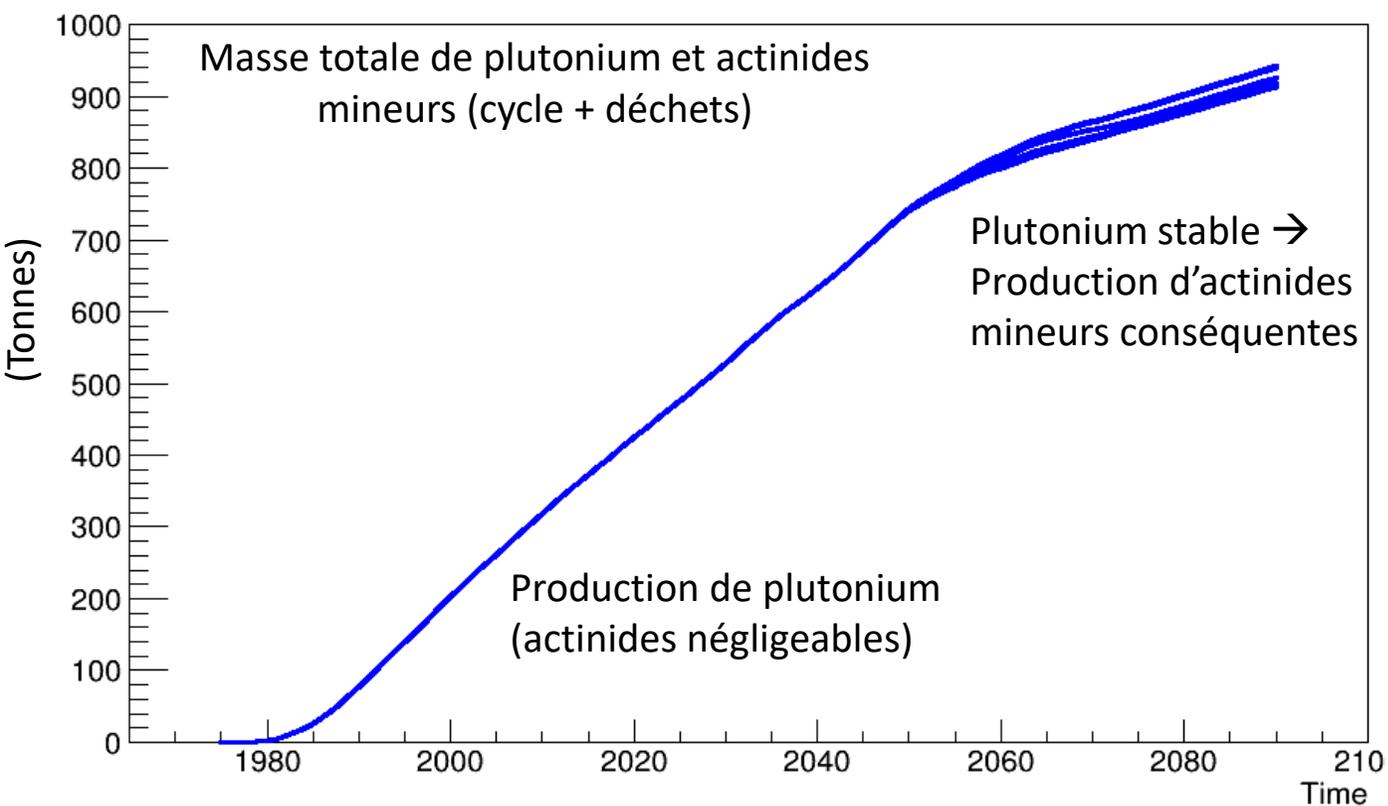
# Partie 4 : Retour sur les scénarios nucléaires

## Le projet MRREP et ses conséquences

→ Déploiement des combustibles intégrant du Plutonium issu des MOX en 2040 !

➤ Pour la problématique des déchets, l'observable d'intérêt est plutonium + actinides mineurs !

→ *Le plutonium est stabilisé mais on augmente fortement la production d'actinides mineurs (et donc les déchets vitrifiés)*



➤ **Le multi-recyclage du plutonium ne conduit pas à une économie d'uranium naturel**

### ➤ L' « apport » du débat public



### ➤ Horizon temporel des réacteurs au sodium repoussé à 2090

### ➤ Requalifier certaines matières en **déchets** ?

- *MOX usés qui s'entassent dans des piscines maintenant pleines*
- *Uranium appauvri et uranium de retraitement*

Conclusion du débat : si **pas d'utilisation** planifiée alors ces **matières** doivent être **considérées** comme des **déchets** !

### ➤ A mettre en face des « intérêts nationaux » :

- *Conserver le plutonium*
- *Remplacement des installations à la Hague (à l'horizon 2050)*
- *Problématique du stockage direct (crise des piscines)*

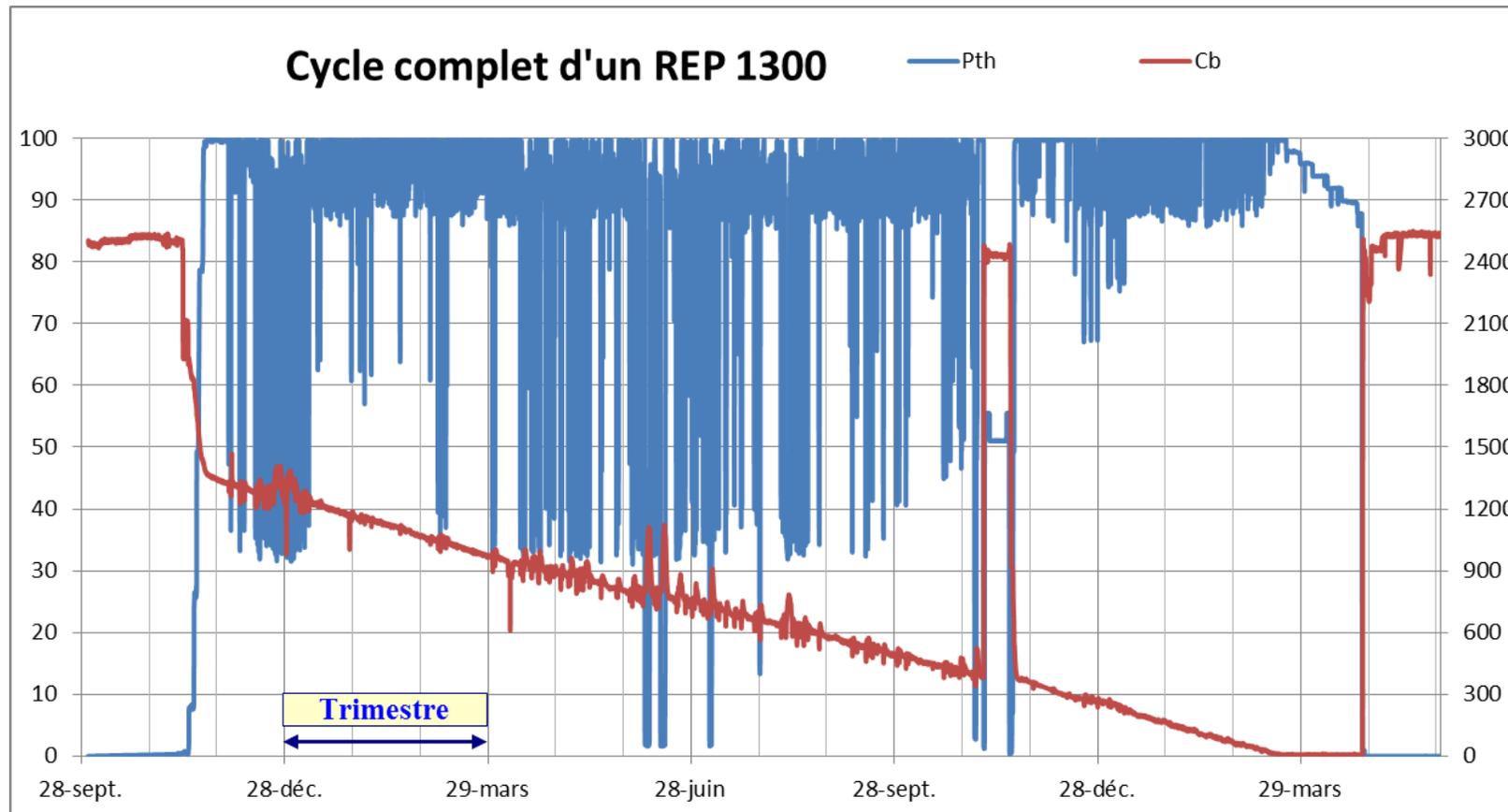
→ **Il faut faire quelque chose du plutonium et de l'uranium**

→ **Recyclage du plutonium dans les EPR2** (prochaine génération, pas encore signée)

## Partie 4 : Retour sur les scénarios nucléaires

### Des contraintes qui s'accumulent aux contraintes du mix en évolution

- Le nucléaire assure le suivi de charge



- Baisse profonde (~30% de la puissance maximal)
- +/- 10% instantanément
- +/- 5% de la puissance par minute
- Contrainte sur matériaux combustibles (interaction pastille/gaine)

} ~ au gaz et fioul

- Le suivi de charge apporte des contraintes de pilotage
- Augmentation des coûts
- Probablement plus complexe en MOX

- Un intérêt qui dépend fortement du statut du plutonium

*Augmentation forte du nucléaire*

Matière valorisable (et précieuse)

- Un point commun : des machines de faibles puissances

→ Peu de fission par an : (26 kg de consommation de Pu/an pour 40 MWe ; 260 kg pour 400 MWe)

Besoin de beaucoup de réacteur pour produire la puissance

→ Fort inventaire en matière fissile

*Pas d'augmentation notable du nucléaire*

Déchets majoritaires

Réduction d'inventaire Pu peu efficace avec des AMR

- Un intérêt possible comme machine dédiée à la transmutation
  - Quel modèle économique ? Compatible avec un modèle start-up ?
- Un intérêt possible comme « précurseur » d'une filière industrielle (régénératrice)
  - Doit-on les classer comme des « réacteurs de recherches » ?

# Quelques mots de conclusion

## Des éléments de rappels

### ➤ On observe un regain d'intérêt pour l'énergie nucléaire *de fission* aujourd'hui

- *Source d'électricité décarbonée ET pilotable*

### ➤ Urgence sur le parc actuel

- Extension de la durée de vie du parc existant
- Construction de nouveaux réacteurs « REP » (SMR & EPR2)
- Maintien et jouvence des installations du cycle
  - Amont : Mines, enrichissement et conversion*
  - Aval : Retraitement et refabrication du combustible*

Utilisation de l'uranium 235

Statut du plutonium ?

### ➤ Le recyclage du plutonium en REP : une stratégie d'attente

- La régénération du fissile possible avec des réacteurs à neutrons rapides
- Besoin d'une grande quantité de plutonium pour un parc Français 100% RNR
- La régénération se justifie par une crise de l'uranium
  - Peu de chance d'une « transition » EPR → RNR imposé par un manque d'uranium*

### ➤ Forte incertitude, imposée par le contexte internationale qui appelle une anticipation forte

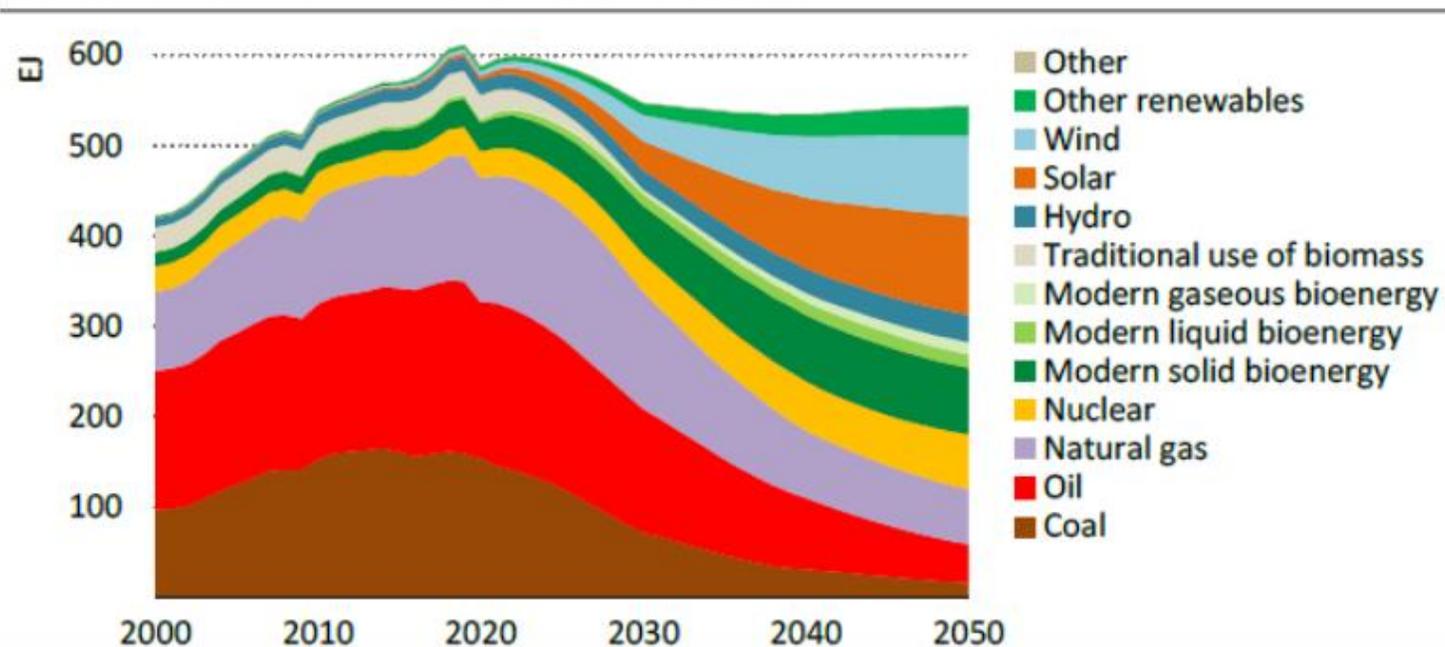
- Conflit de « temporalité » du nucléaire
  - *Prise de la décision*
  - *Exploitation des réacteurs*
  - *Prospectives énergétiques*

# Quelques mots de conclusion

## L'impact du contexte international

- NZE Scénario = 135% (+ 500 Gwe,) de nucléaire d'ici 2050 = 344 EPR dans le monde (1800 SMR de 300 MWe)
  - Attention : Scénario normatif
  - 14 EPR par an
    - Qui construit ? (Objectif Framatome = +1 EPR/an)
    - Ou ?

**Figure 2.5** ▶ Total energy supply in the NZE



- Extrapolation du rythme de construction Français de 1980
  - En Chine seule → > ~ 760 EPR en plus
  - En Chine, en Inde, en Europe et Amérique du Nord : → > +2100 EPR → ~Facteur 8