

Physique des réacteurs et du cycle

–

Le cycle électronucléaire actuel : quels enjeux de R&D ?

Journée thématique de la SFP

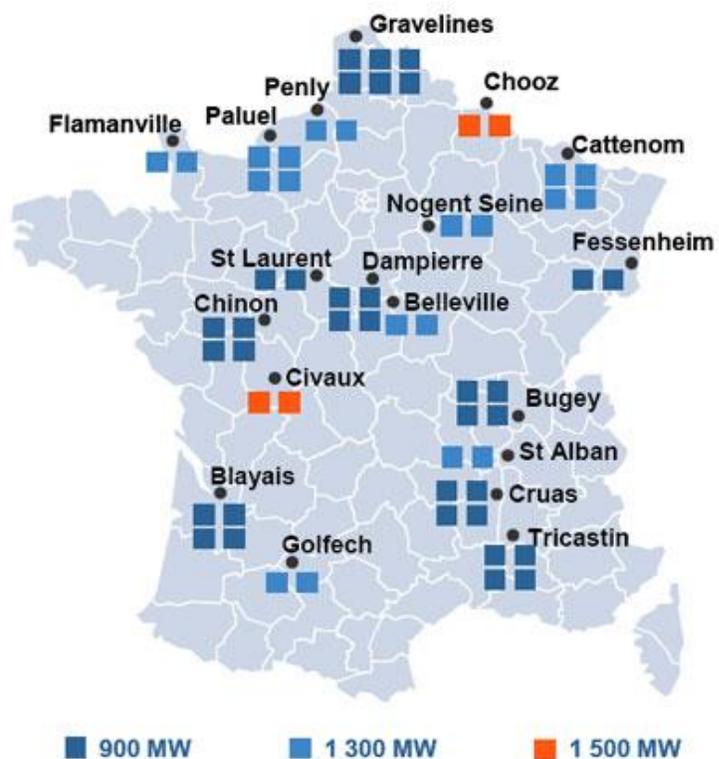
« La filière nucléaire à l'heure de la transition énergétique. Quels enjeux et quelles perspectives »

17 – 18 mars 2022

Xavier Doligez, IJC-lab Orsay

Introduction : Le nucléaire dans la transition énergétique

Panorama national et mondial actuel

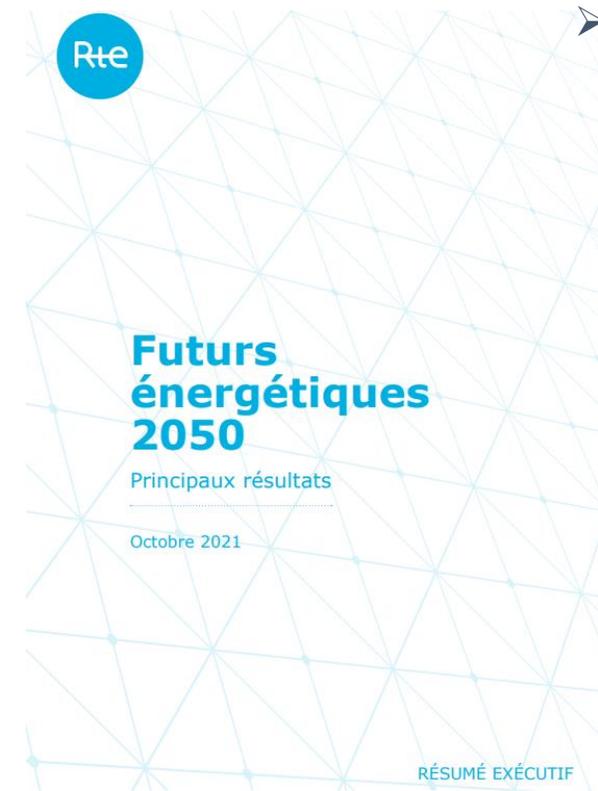


- 56 réacteurs (18 sites)
- 1 seule technologie : **REP** (Réacteurs à Eau sous Pression)
- 1 tranche en construction (FA3)
- **~70%** de l'électricité française



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

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



➤ 18 enseignements (5 relatifs au nucléaire) :

#5 : « **Se passer de nouveaux réacteurs nucléaires** implique des rythmes de **développement des énergies renouvelables plus rapides** que ceux des pays européens les plus **dynamiques** »

#6 : « Construire de **nouveaux réacteurs nucléaires est pertinent du point de vue économique**, a fortiori quand cela permet de conserver un parc d'une quarantaine de GW en 2050 (nucléaire existant et nouveau nucléaire) »

#8 : « [...] Au-delà, le besoin de construire de **nouvelles centrales thermiques** assises sur des stocks de gaz décarbonés (dont l'hydrogène) est important si **la relance du nucléaire est minimale** et il devient massif – donc coûteux – si l'on tend vers 100% renouvelable »

#11 : « Les scénarios à très **hautes parts d'énergies renouvelables**, ou celui nécessitant la prolongation des réacteurs nucléaires existants au-delà de 60 ans, **impliquent des paris technologiques lourds** pour être au rendez-vous de la neutralité carbone en 2050 »

#17 : « Pour **2030 : développer les énergies renouvelables** le plus rapidement possible **et prolonger les réacteurs nucléaires** existants dans une logique de maximisation de la production bas-carbone augmente les chances d'atteindre la cible du nouveau paquet européen "-55% net" »

→ Complémentarité ENR et Nucléaire

→ Intérêt du nucléaire pour le pilotage (fermeture des centrales thermiques à flamme qui permettent le suivi de charge)

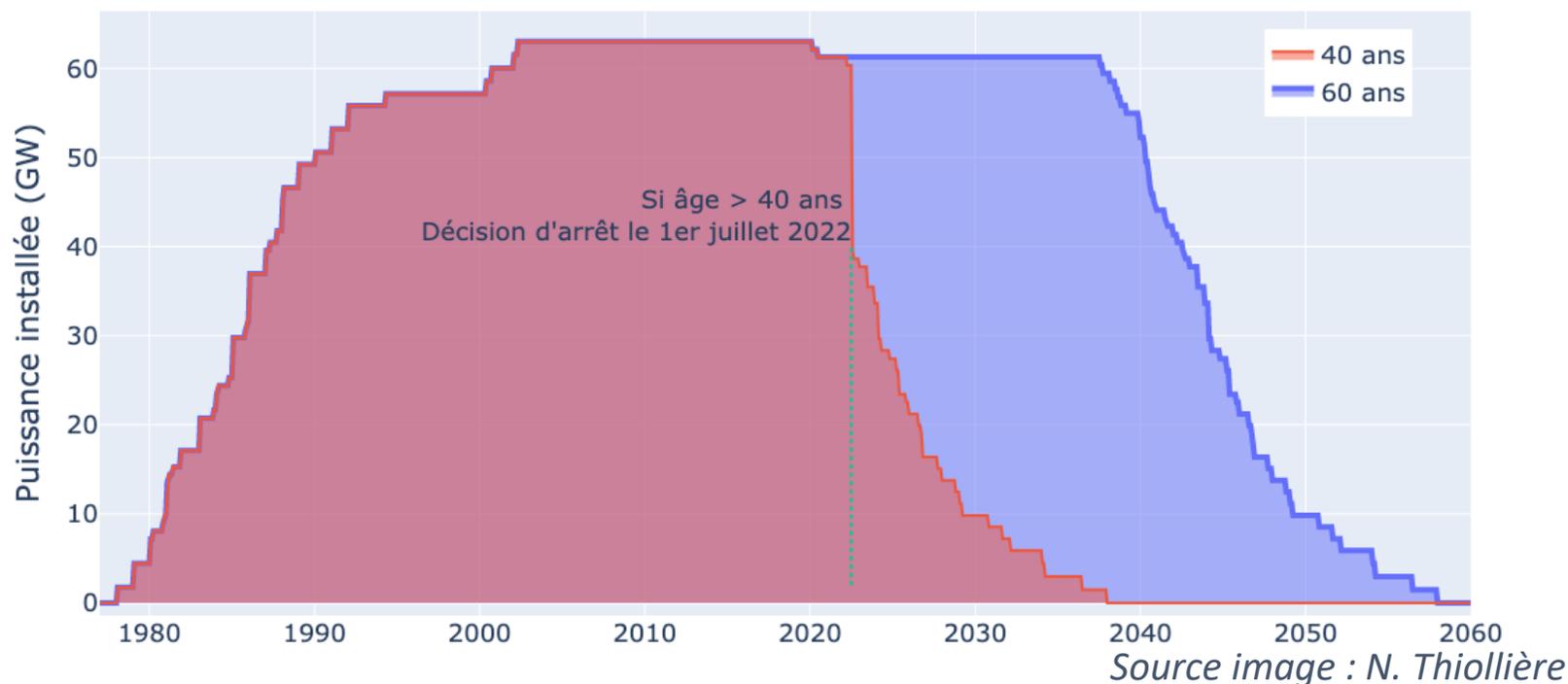
→ Appel au « réalisme » à propos du développement de nouvelles technologies et aux déploiements de nouvelle source de production

→ Pas (ou très peu) de mentions des problématiques « combustibles »

Introduction : Le nucléaire dans la transition énergétique

L'évolution du parc

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



- Les années **2025/2050** sont **clefs** pour la relance du nucléaire (effectuée dans le cadre de la transition énergétique) :
 - Sollicitation des réacteurs pour le **suivi de charge** (cf. présentation S. Feutry)
 - *Extension de la durée de vie des réacteurs*
 - Renouvellement du parc
 - Renouvellement des installations du cycle : La Hague (retraitement) et MELOX (fabrication)
- Le déploiement des **réacteurs à neutrons rapides** (génération IV) est repoussé **après 2080** (décision d'arrêt d'ASTRID en 2019)

1. Fonctionnement des réacteurs

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

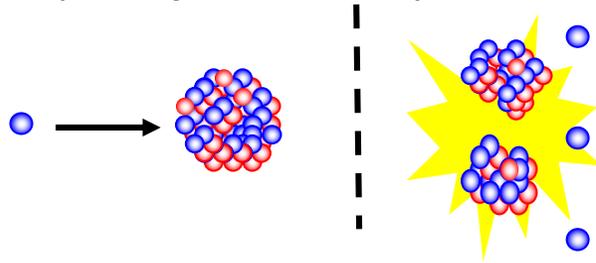
2. Le cycle du combustible Français

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

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

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

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



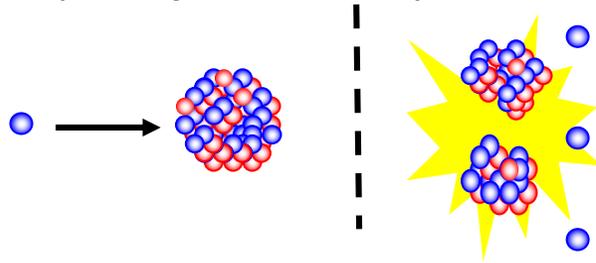
→ On libère 2 produits de fission et 2 (ou 3) neutrons en plus d'une (très) grande quantité d'énergie (200 MeV)

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

Fonctionnement des réacteurs

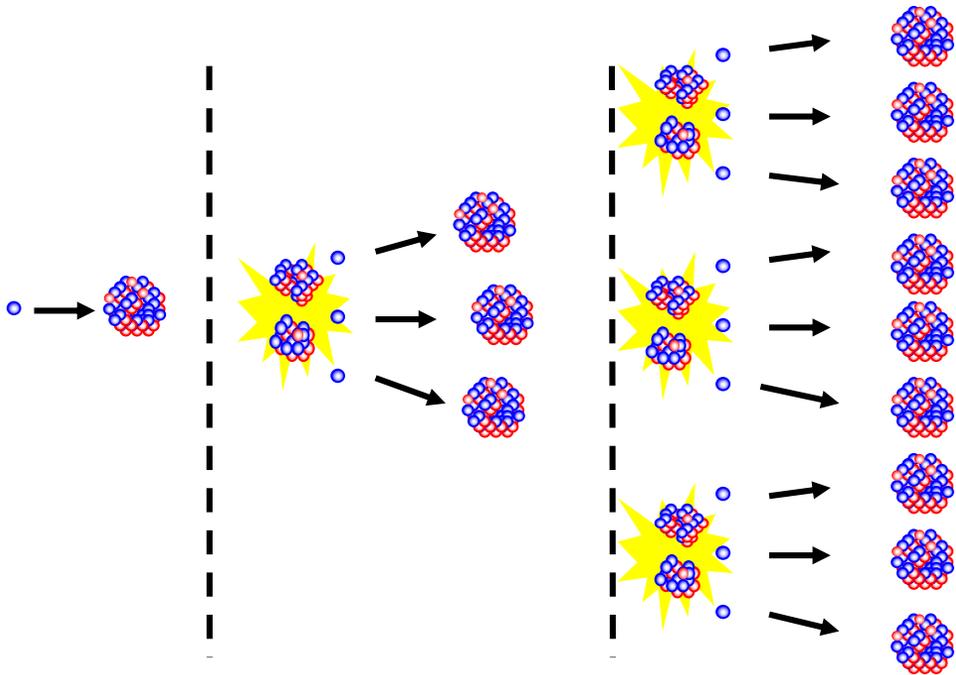
La fission et la réaction en chaîne

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



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

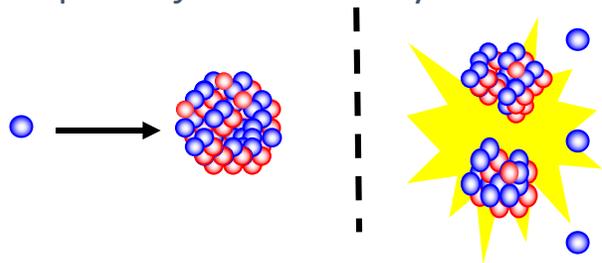
- Suivant le noyau qui fissionne, la quantité d'énergie à apporter peut varier
 - **L'uranium 235 est le seul noyau présent sur terre qui peut fissionner quelque soit l'énergie cinétique du neutron**
 - **L'uranium 238 nécessite des neutrons d'énergie cinétique supérieur à 1,6 MeV**



Fonctionnement des réacteurs

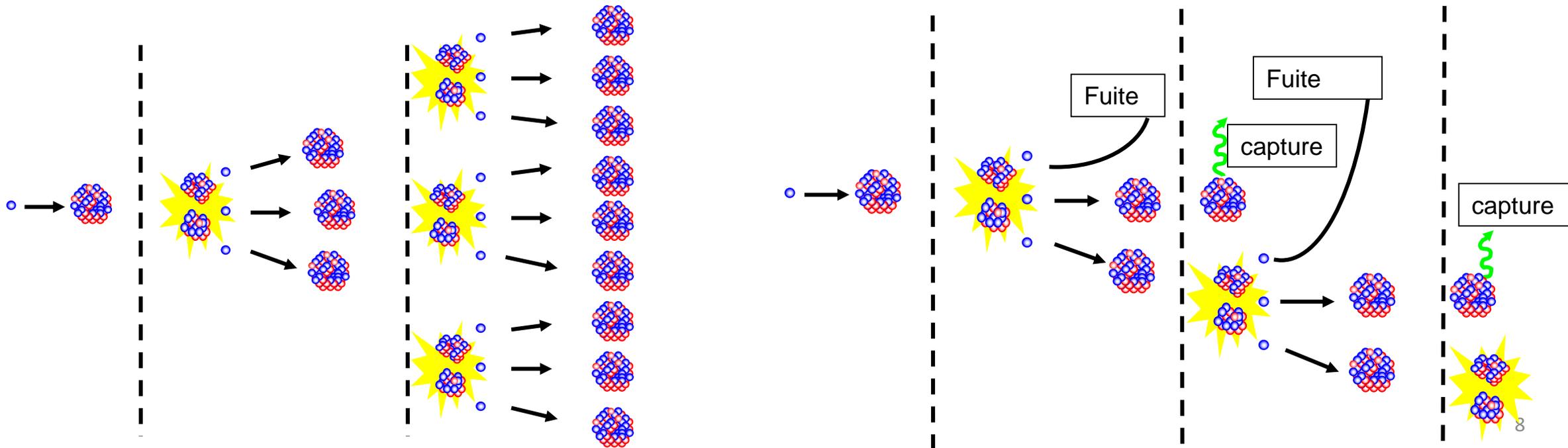
La fission et la réaction en chaîne

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



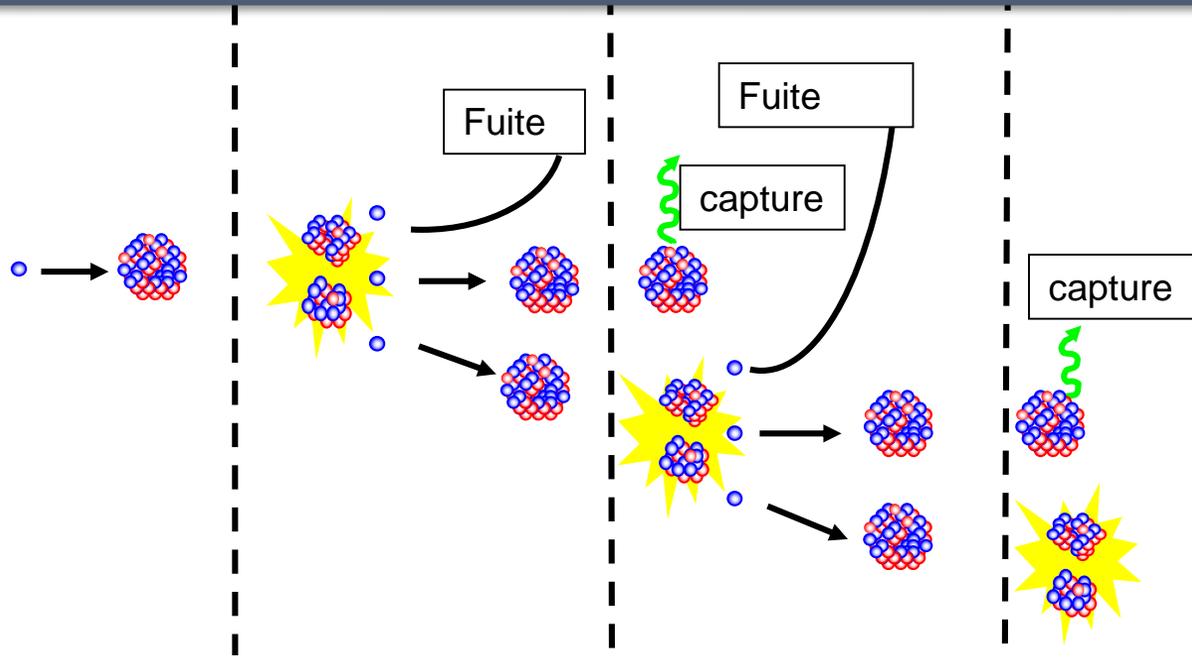
→ On libère 2 produits de fission et 2 (ou 3) neutrons en plus d'une (très) grande quantité d'énergie (200 MeV)

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



Fonctionnement des réacteurs

Réacteurs à neutrons thermiques



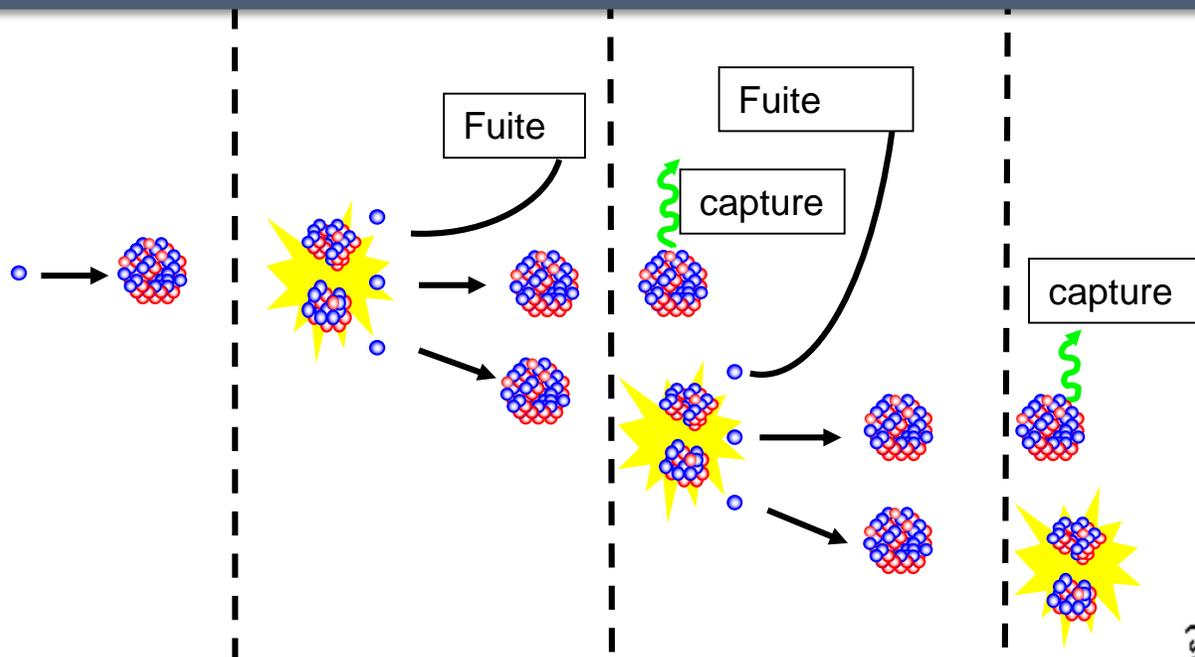
$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Nombre de fission à la génération } i+1}{\text{Nombre de fission à la génération } i}$$

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

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

Fonctionnement des réacteurs

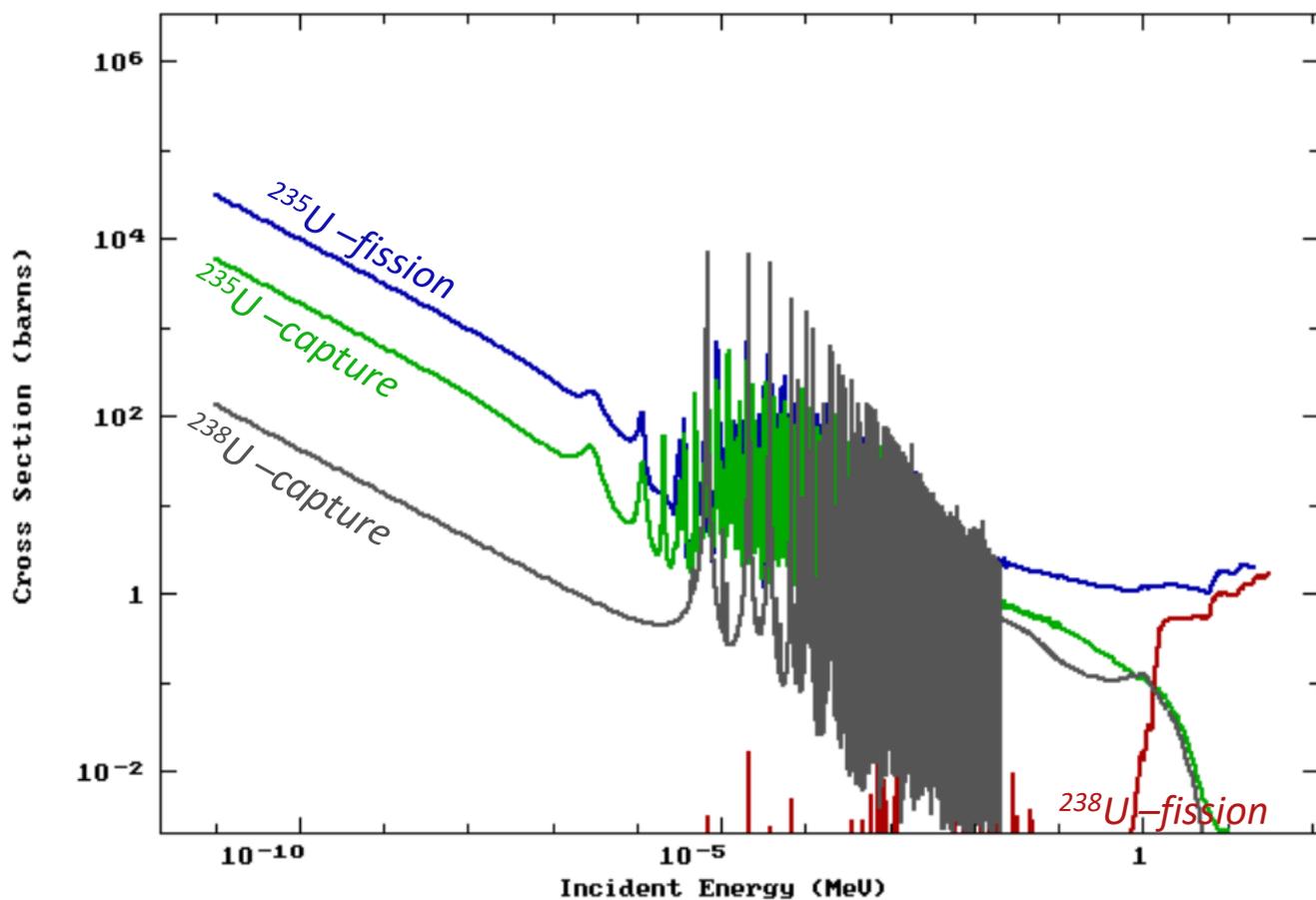
Réacteurs à neutrons thermiques

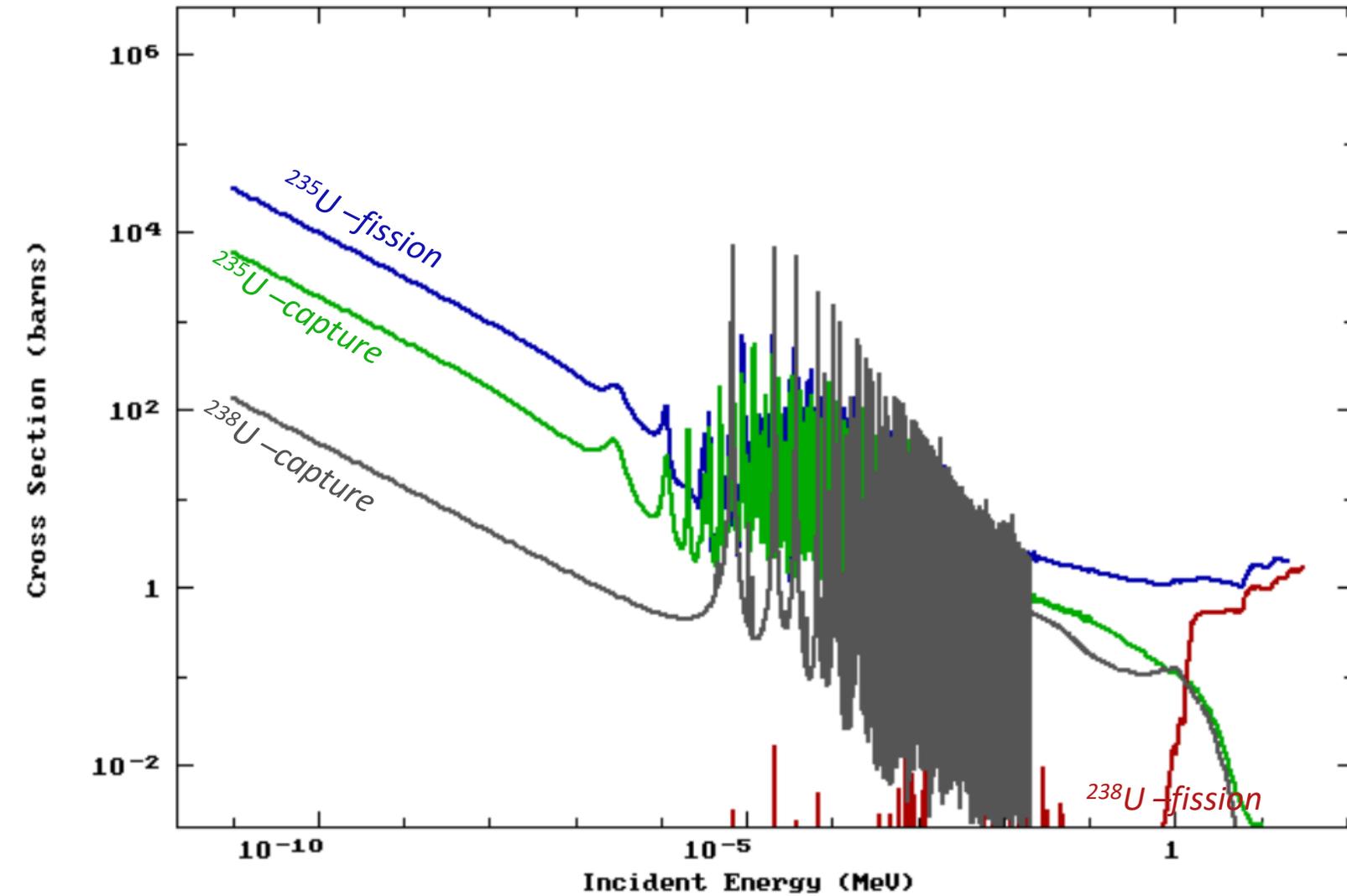


$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Nombre de fission à la génération } i+1}{\text{Nombre de fission à la génération } i}$$
$$= \frac{\text{Production des neutrons}}{\text{Disparition des neutrons}}$$

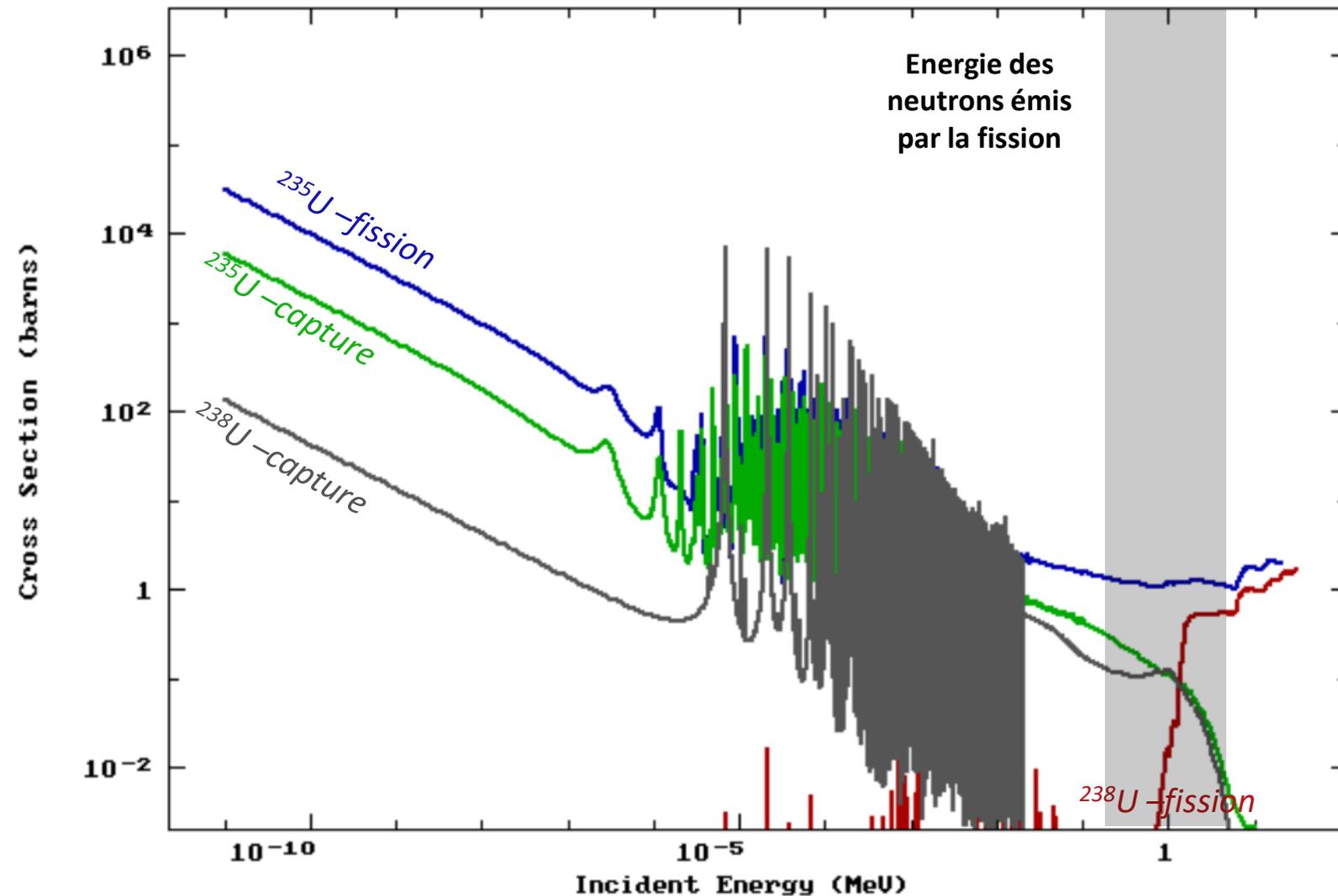
→ En fonctionnement, $k_{\text{eff}} = 1$, le réacteur est critique

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





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



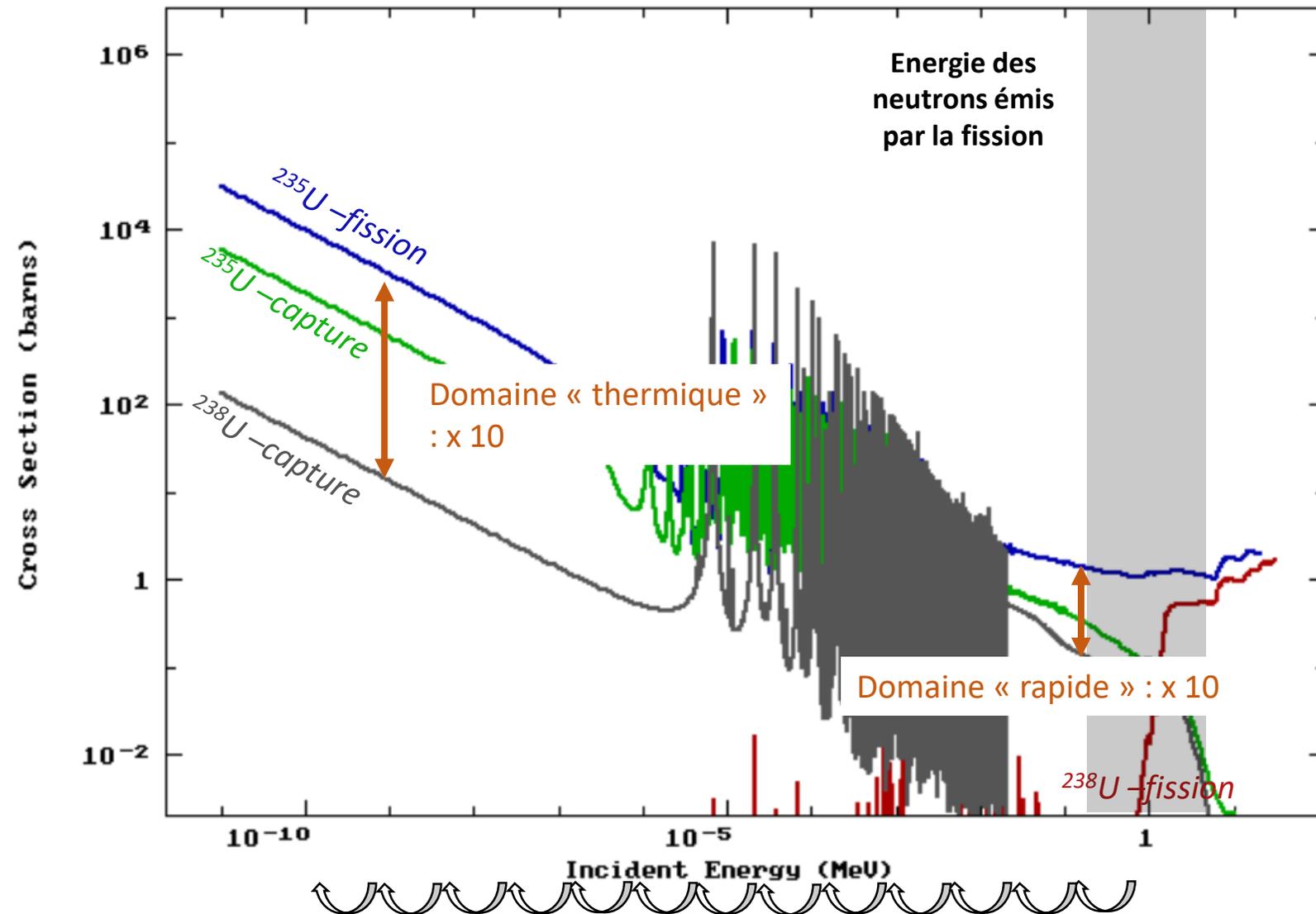
$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Production des neutrons}}{\text{Disparition des neutrons}}$$

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

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

Fonctionnement des réacteurs

Réacteurs à neutrons thermiques



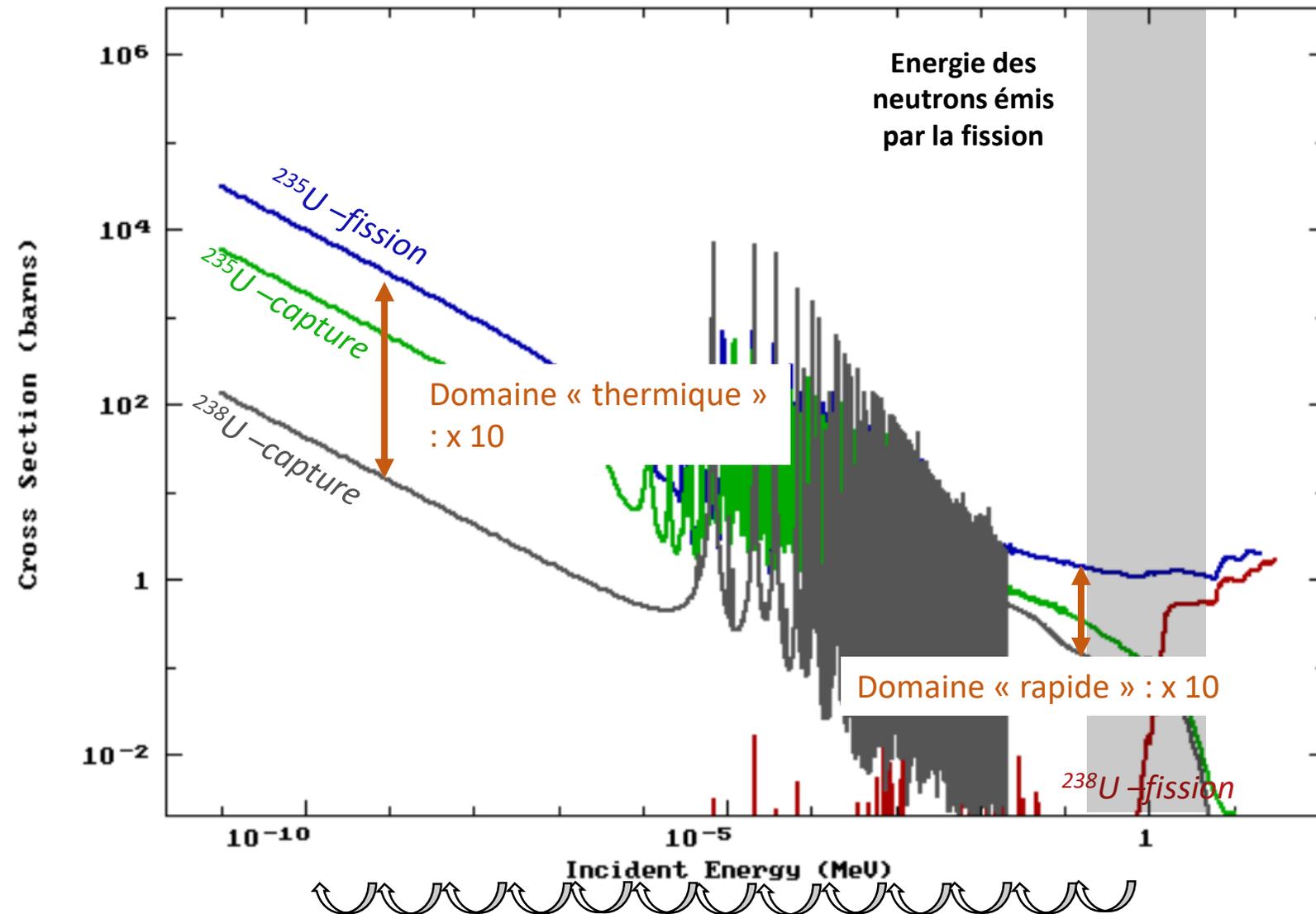
$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Production des neutrons}}{\text{Disparition des neutrons}}$$

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

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

Fonctionnement des réacteurs

Réacteurs à neutrons thermiques



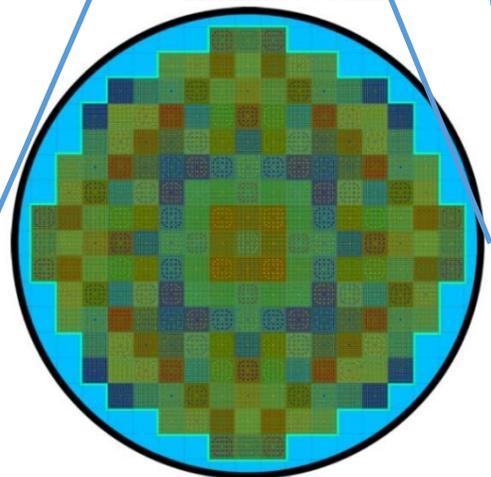
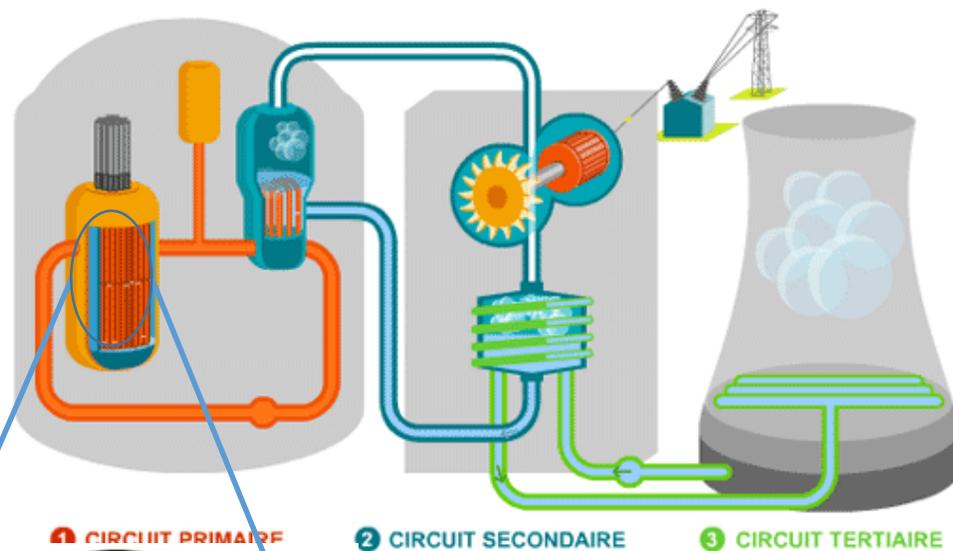
$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{Production des neutrons}}{\text{Disparition des neutrons}}$$

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

Fonctionnement des réacteurs

Présentation d'un REP

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



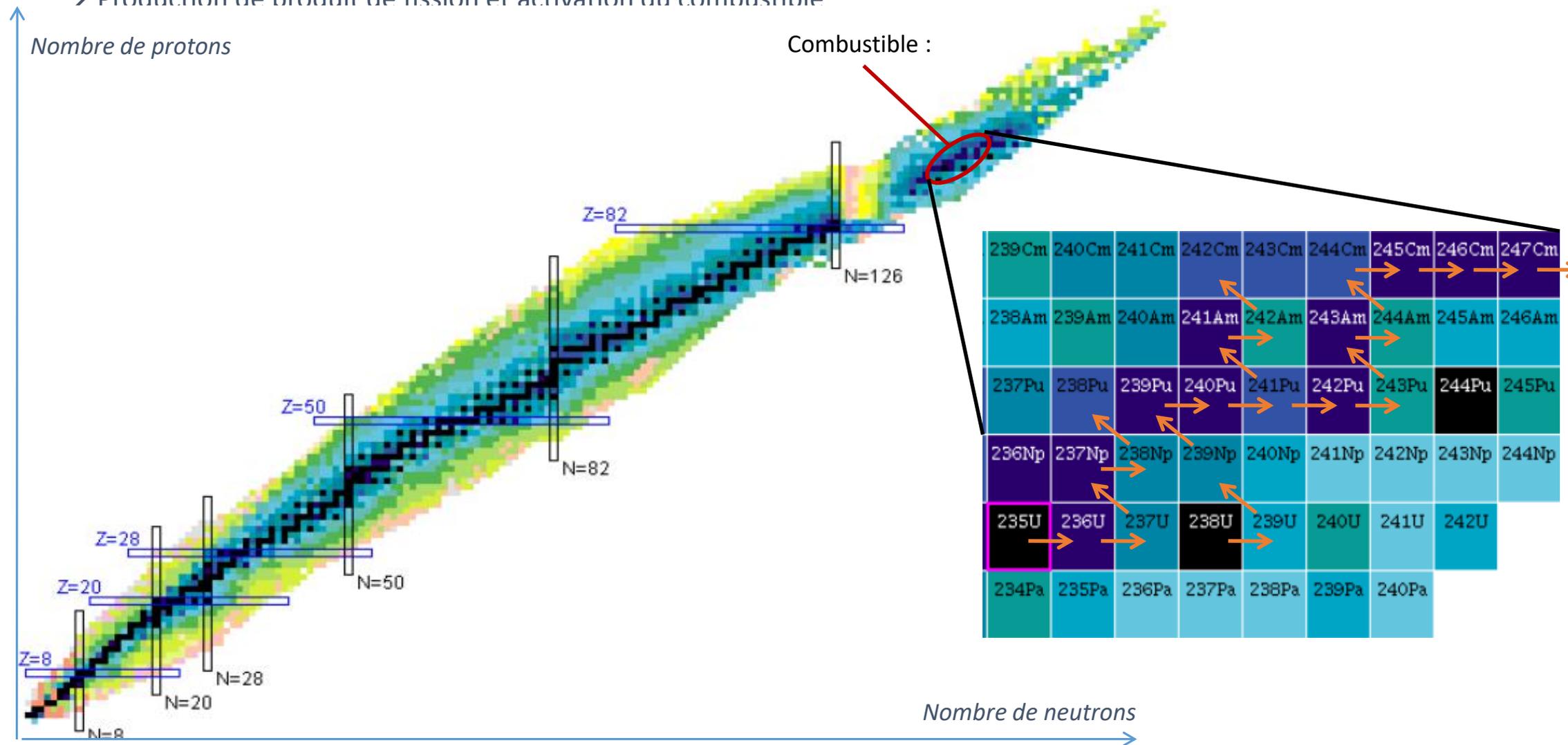
Cœur : ~ 4m de diamètre et 4m de hauteur
Puissance thermique dégagée de 3 à 4,5 GW



Fonctionnement des réacteurs

L'évolution du combustible

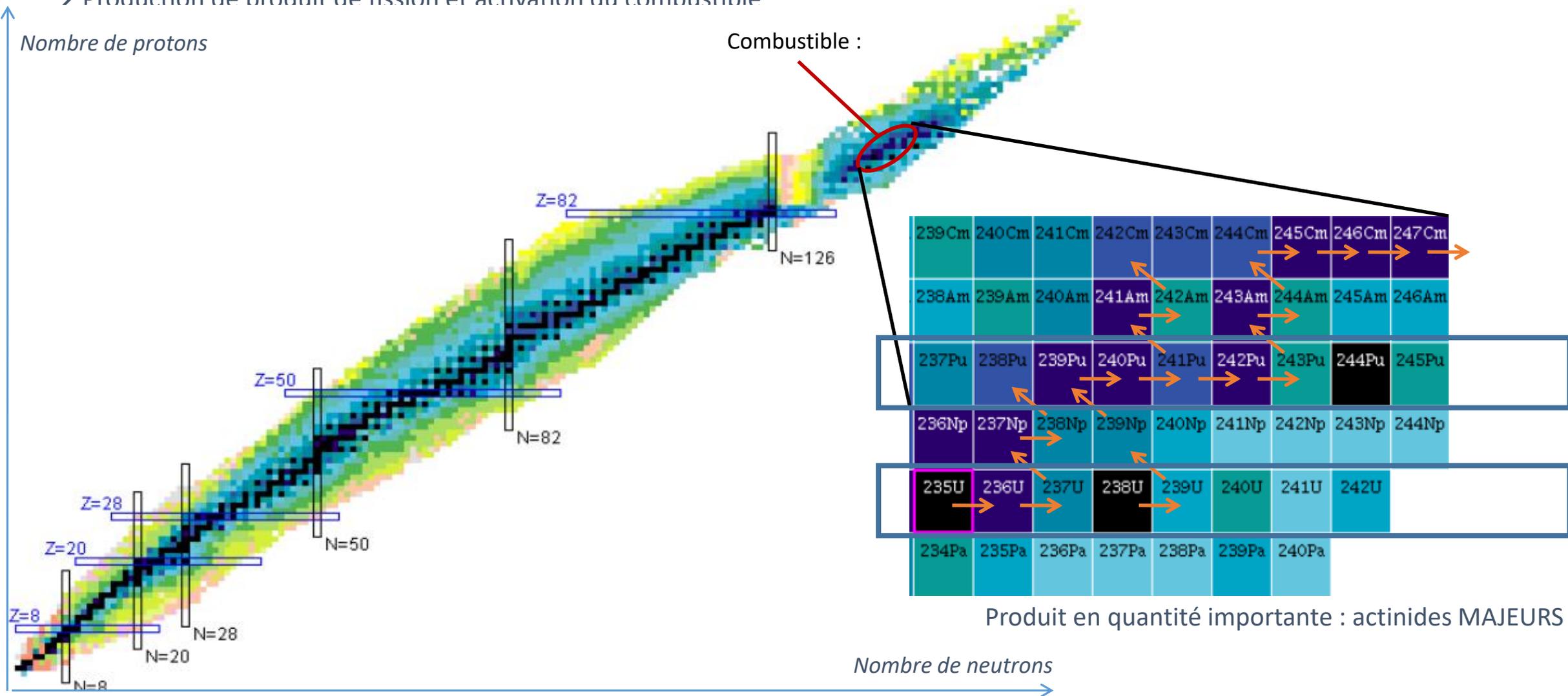
- En fonctionnement, la réaction en chaîne est toujours équilibrée
→ Production de produit de fission et activation du combustible



Fonctionnement des réacteurs

L'évolution du combustible

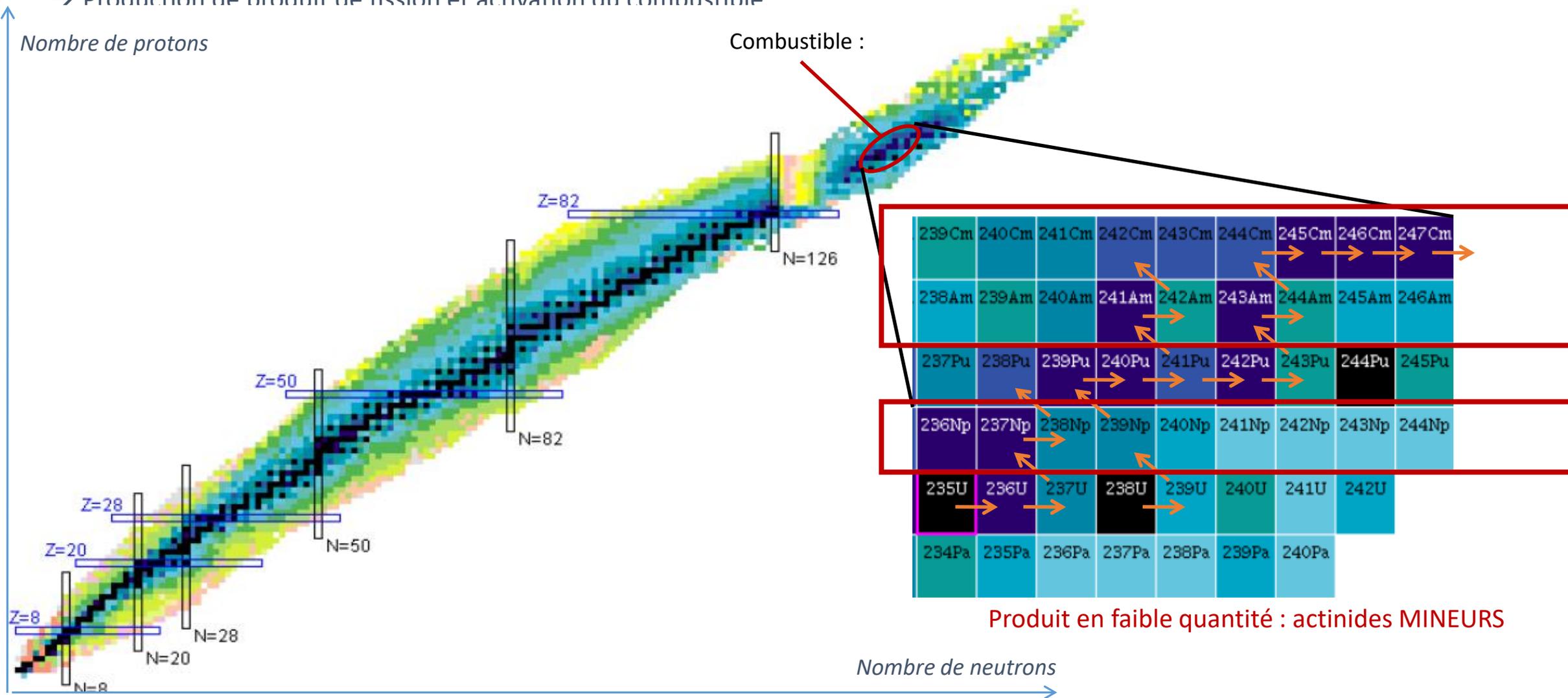
- En fonctionnement, la réaction en chaîne est toujours équilibrée
→ Production de produit de fission et activation du combustible



Fonctionnement des réacteurs

L'évolution du combustible

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



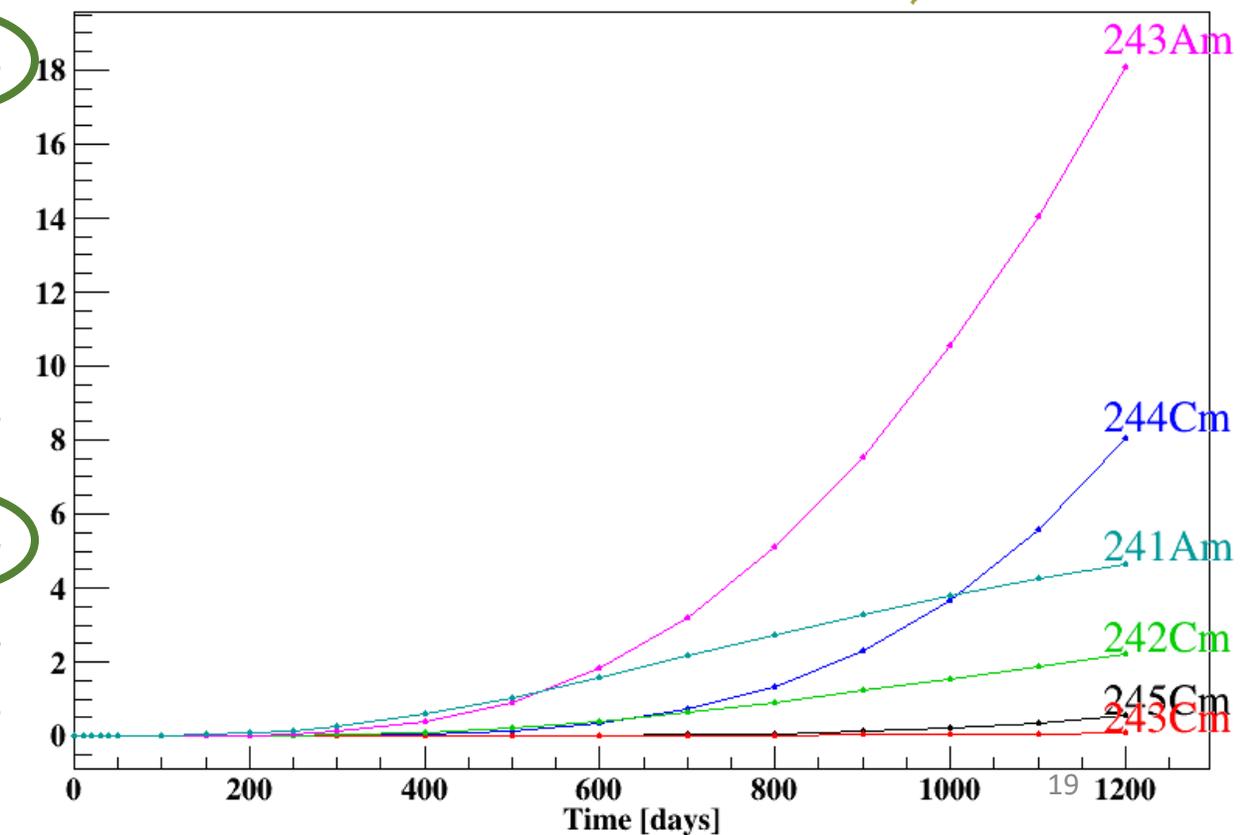
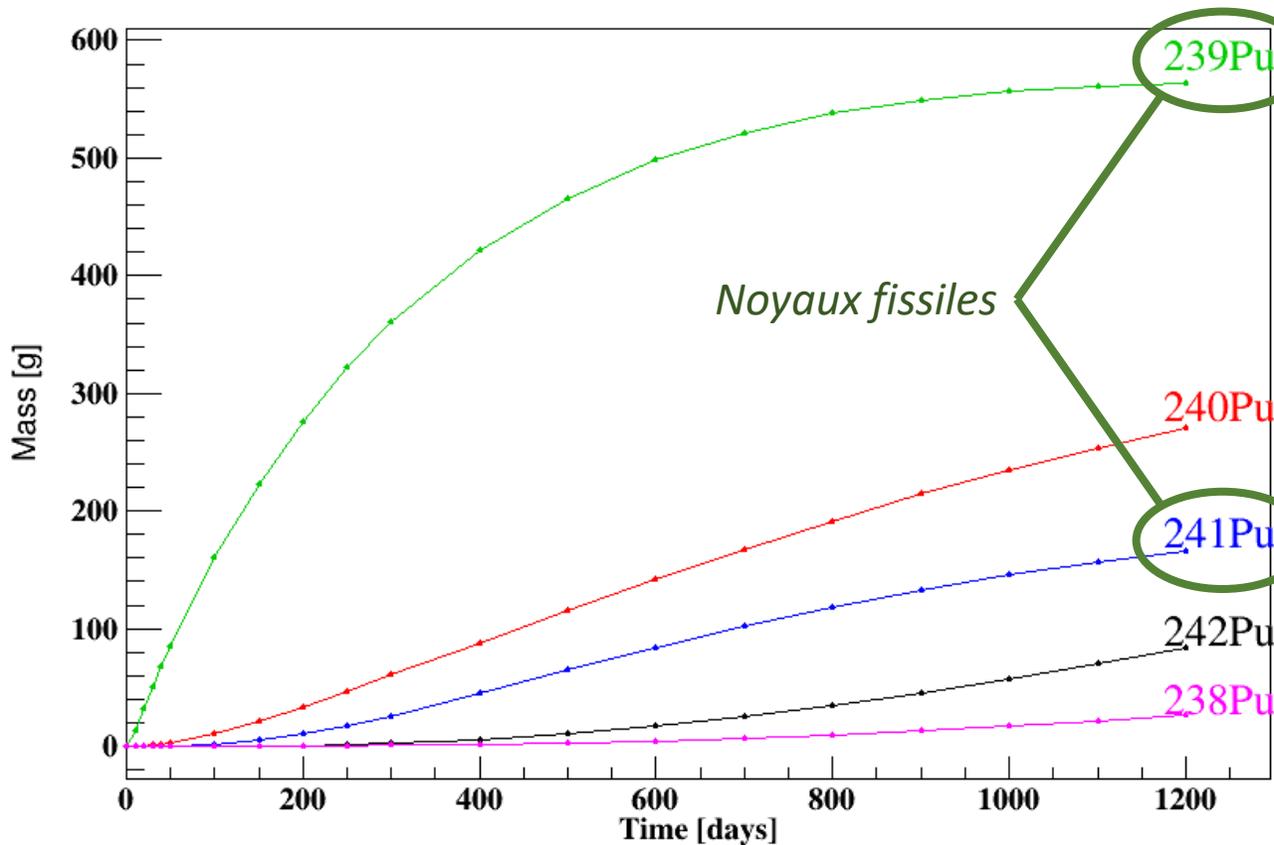
Fonctionnement des réacteurs

L'évolution du combustible

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

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

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



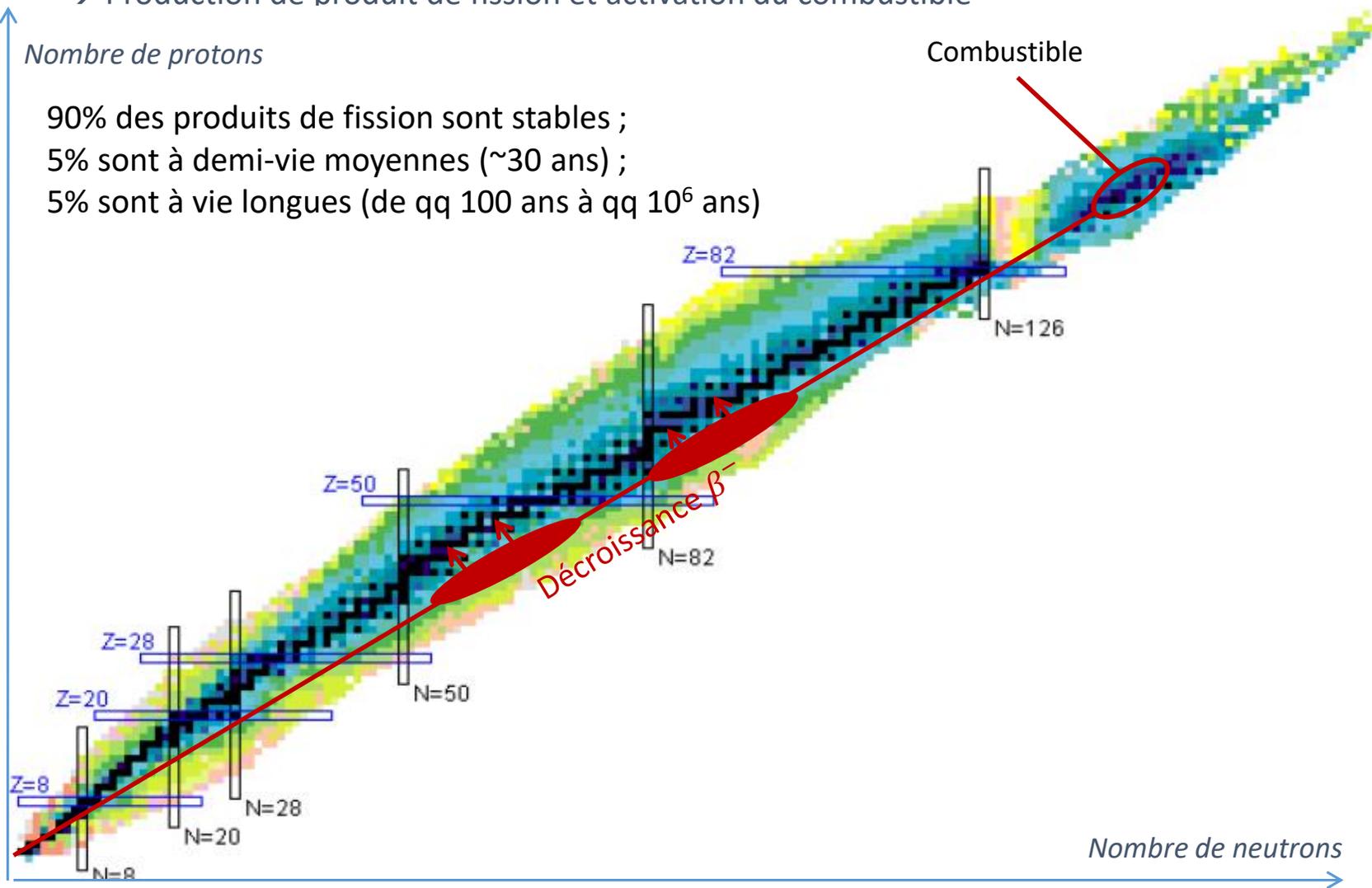
Fonctionnement des réacteurs

Les produits de fission et la chaleur résiduelle

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

Nombre de protons

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



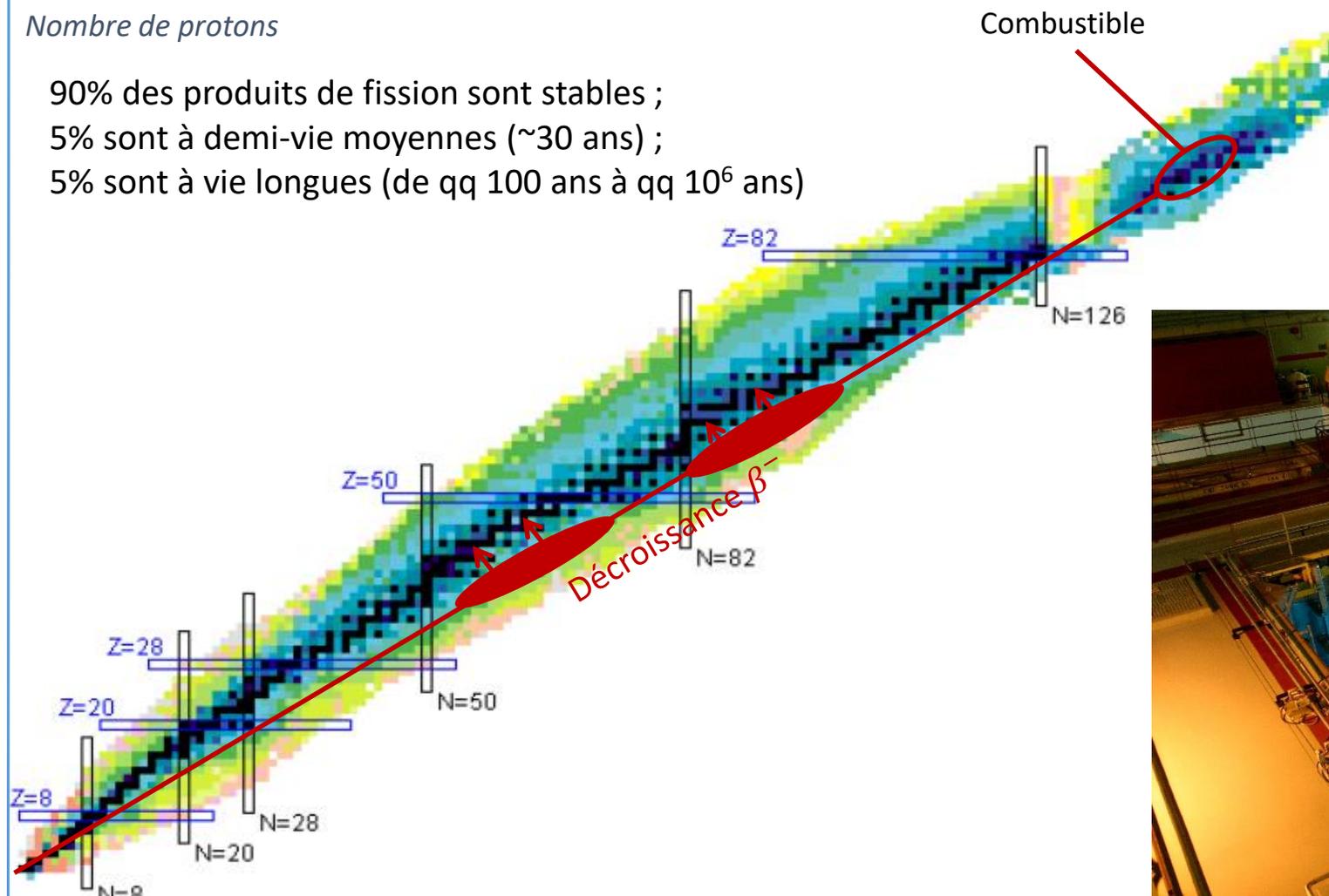
Fonctionnement des réacteurs

Les produits de fission et la chaleur résiduelle

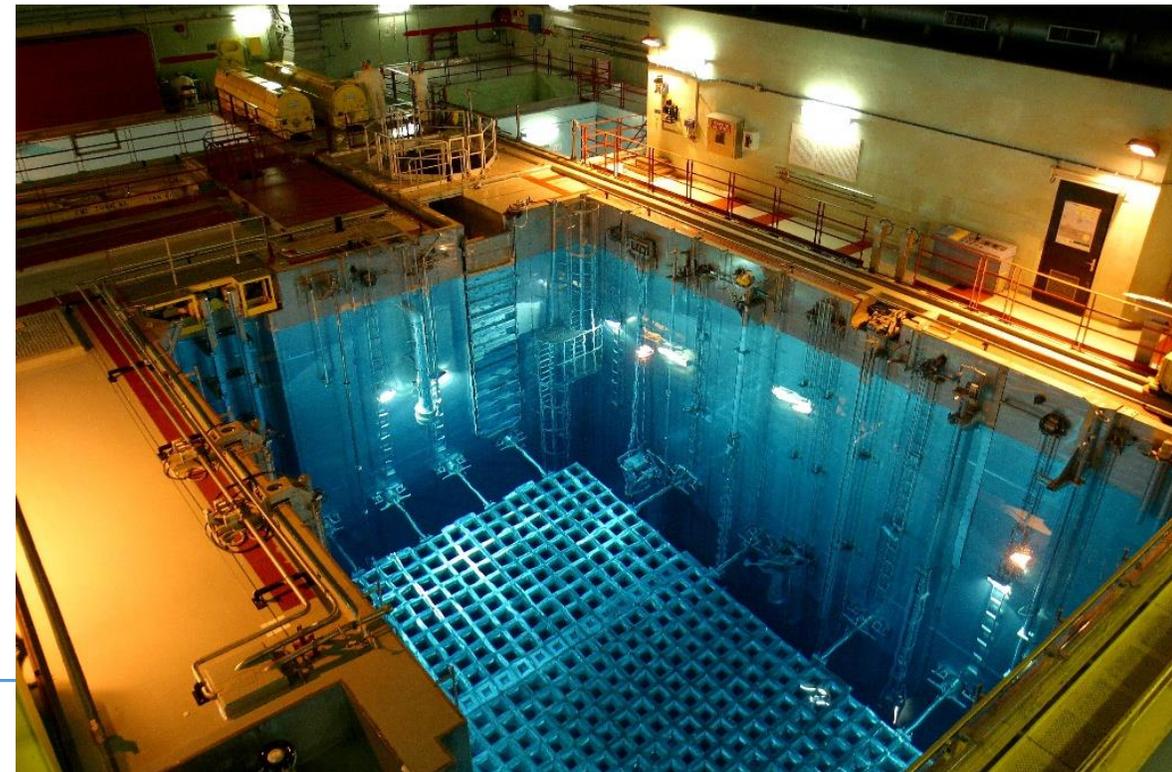
- En fonctionnement, la réaction en chaîne est toujours équilibrée
→ Production de produit de fission et activation du combustible

Nombre de protons

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



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



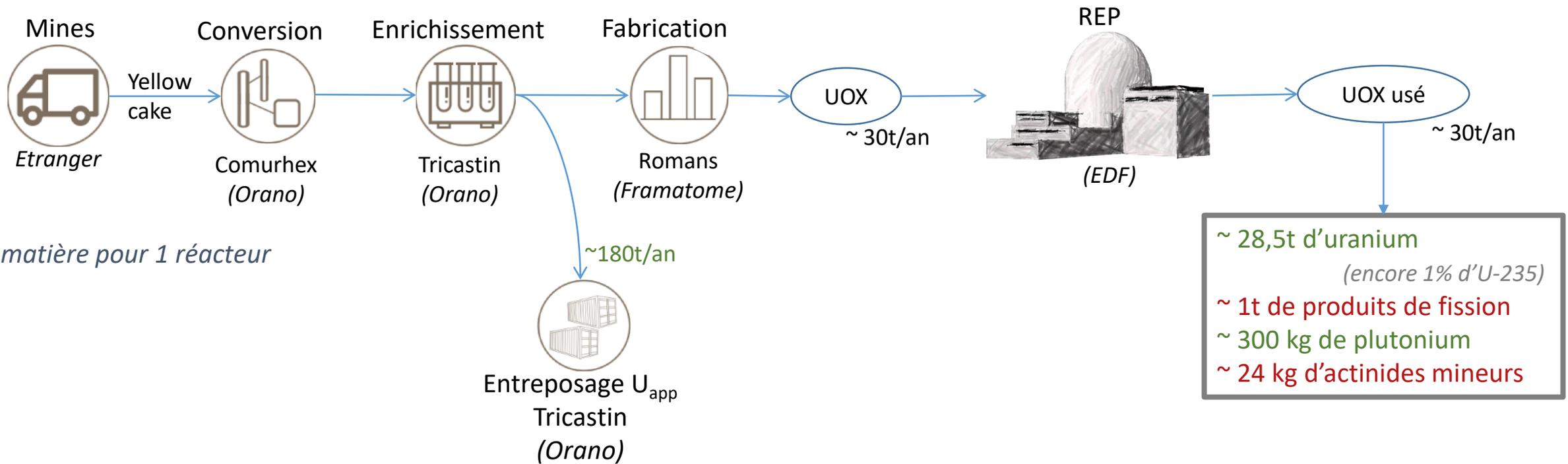
1. Fonctionnement des réacteurs
 - ✓ Principe de la réaction en chaîne
 - ✓ L'importance de la thermalisation des neutrons
 - ✓ Présentation d'un REP
 - ✓ L'évolution du combustible

2. **Le cycle du combustible Français**
 - ✓ **Bilan matière pour un cycle ouvert**
 - ✓ **Spécificité du parc Français : le recyclage du plutonium**
 - ✓ **Comparaison cycle ouvert/cycle MOX**

3. Les enjeux pour le parc à l'échéance 2050
 - ✓ La « crise » des piscines
 - ✓ Le moxage des REP 1300
 - ✓ Le Multi-recyclage du plutonium
 - ✓ EPR vs EPR2
 - ✓ CIGEO : projet de stockage des déchets HA-VL

Le cycle du combustible

Principe d'un cycle ouvert

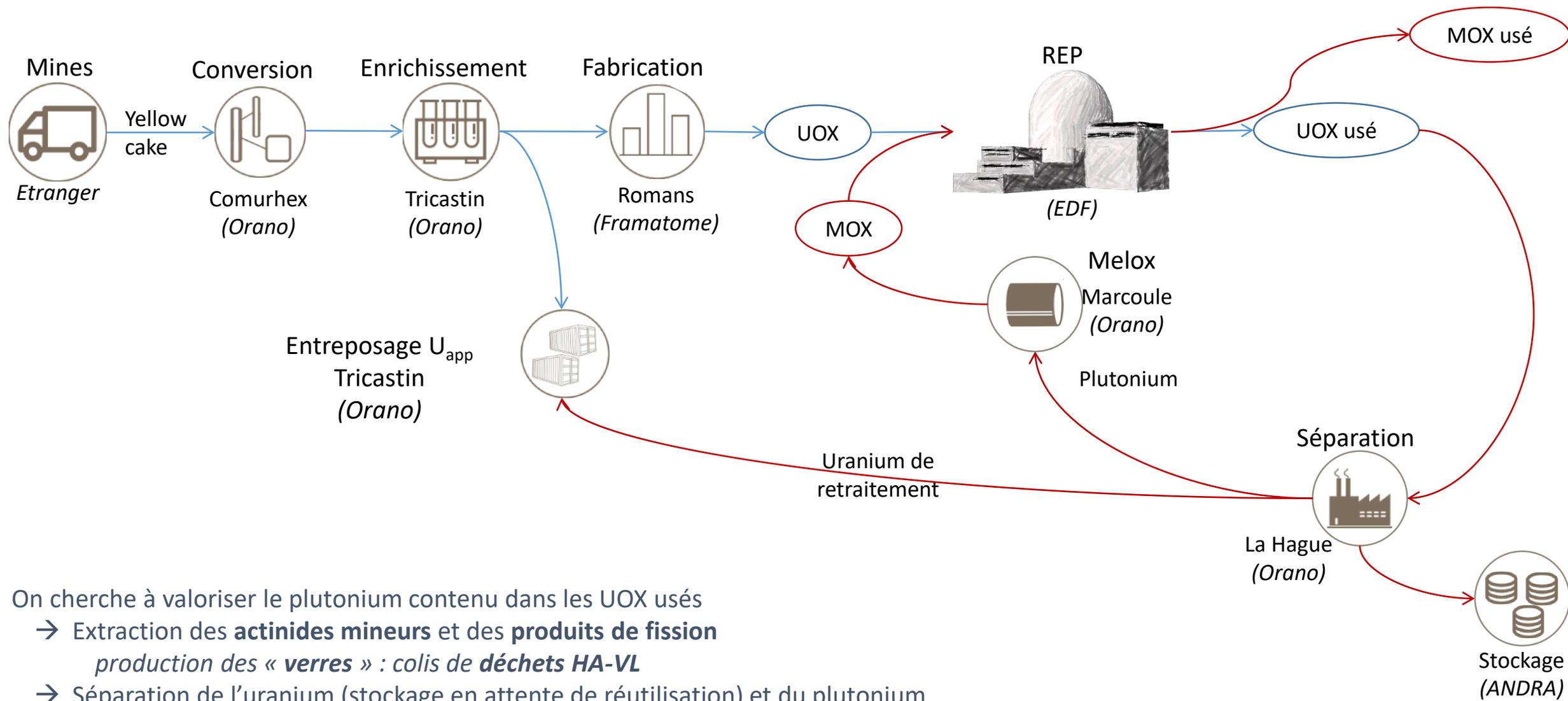


Bilan matière pour 1 réacteur

- Il existe une différence (législative) entre « déchets » et « matière » :
 - ➔ **Matière** : Une matière radioactive est une substance radioactive pour laquelle une **utilisation ultérieure est prévue ou envisagée**, le cas échéant après traitement (article L. 542-1-1 du code de l'environnement)
 - ➔ **Déchets** : Les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles **aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée** (article L. 542-1-1 du code de l'environnement)

Le cycle du combustible

La spécificité française : le mono-recyclage du plutonium

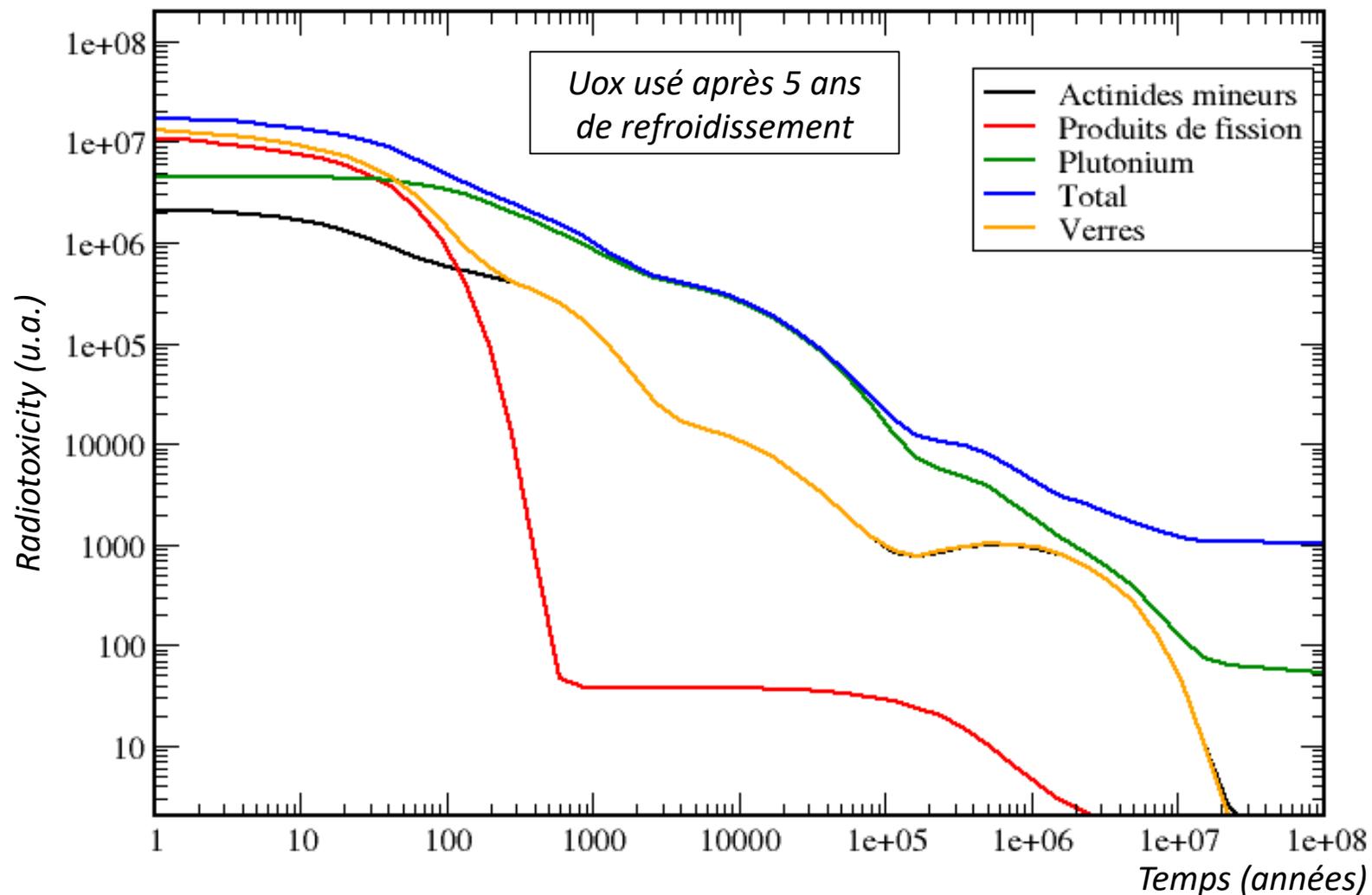


- On cherche à valoriser le plutonium contenu dans les UOX usés
 - Extraction des **actinides mineurs** et des **produits de fission**
production des « verres » : colis de déchets HA-VL
 - Séparation de l'uranium (stockage en attente de réutilisation) et du plutonium
 - Utilisation des combustibles MOX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



➤ Des définitions spécifiques qui conditionnent le débat

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



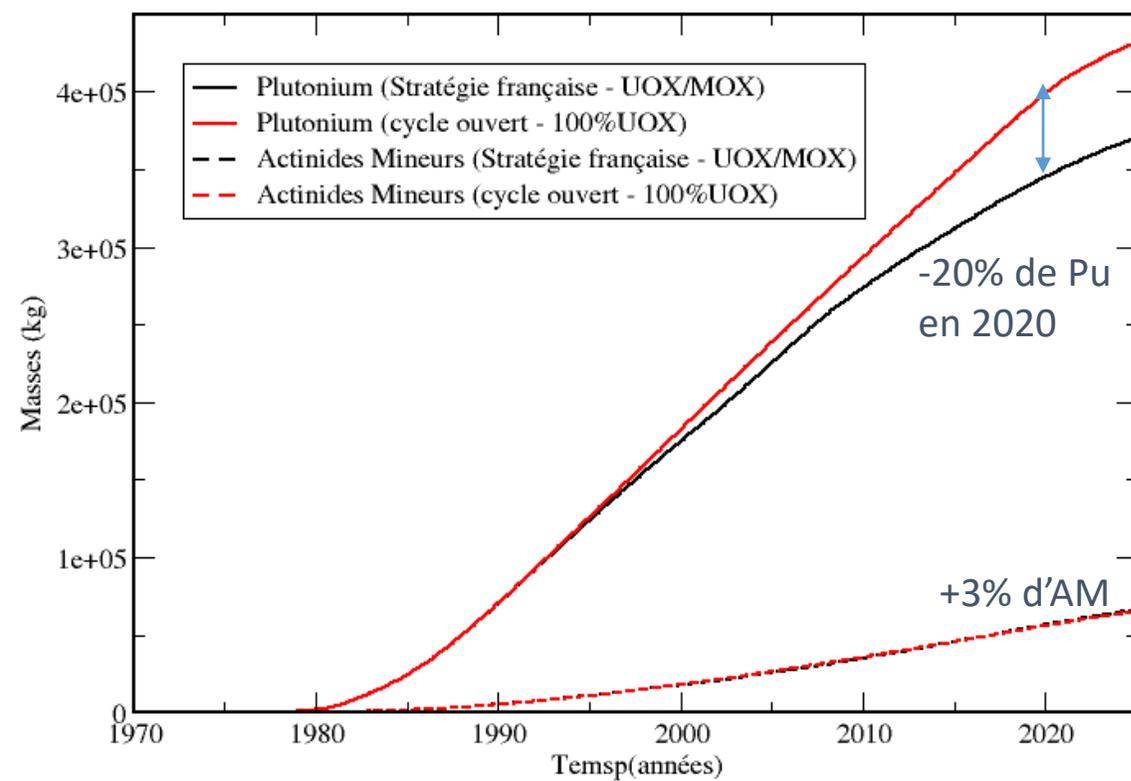
Le cycle du combustible

Les conséquences du recyclage du plutonium

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



Evolution des matières dans le parc français



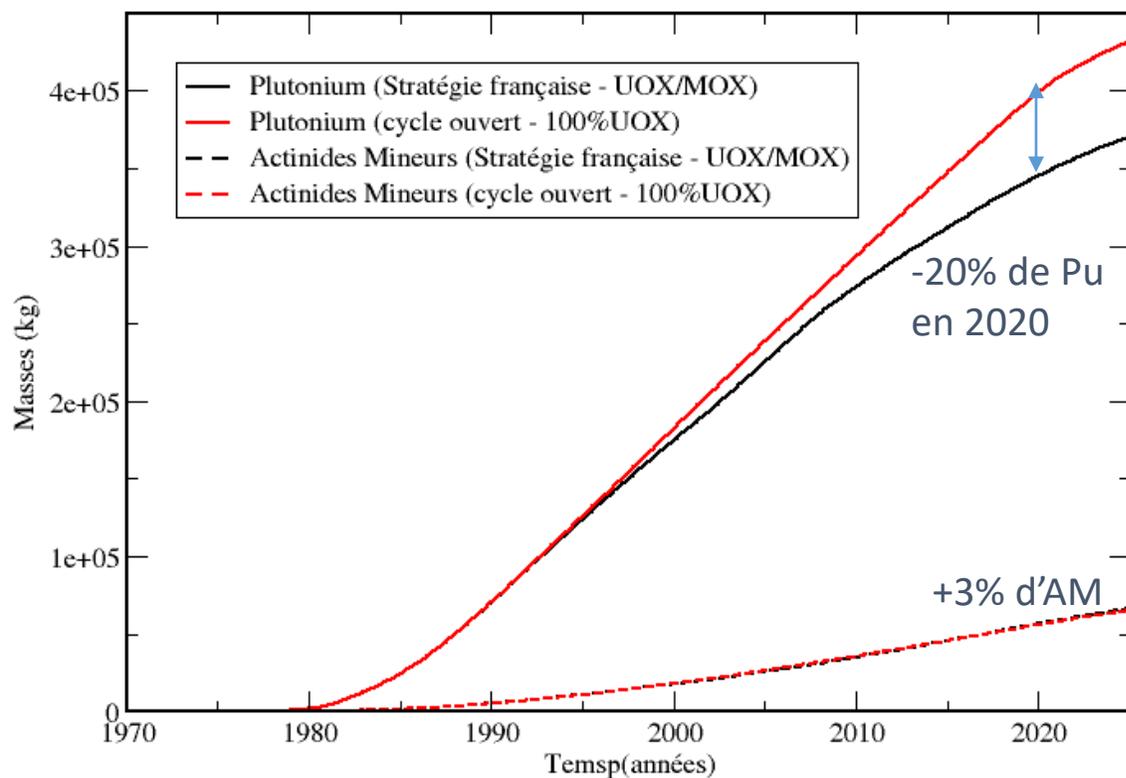
Le cycle du combustible

Les conséquences du recyclage du plutonium

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

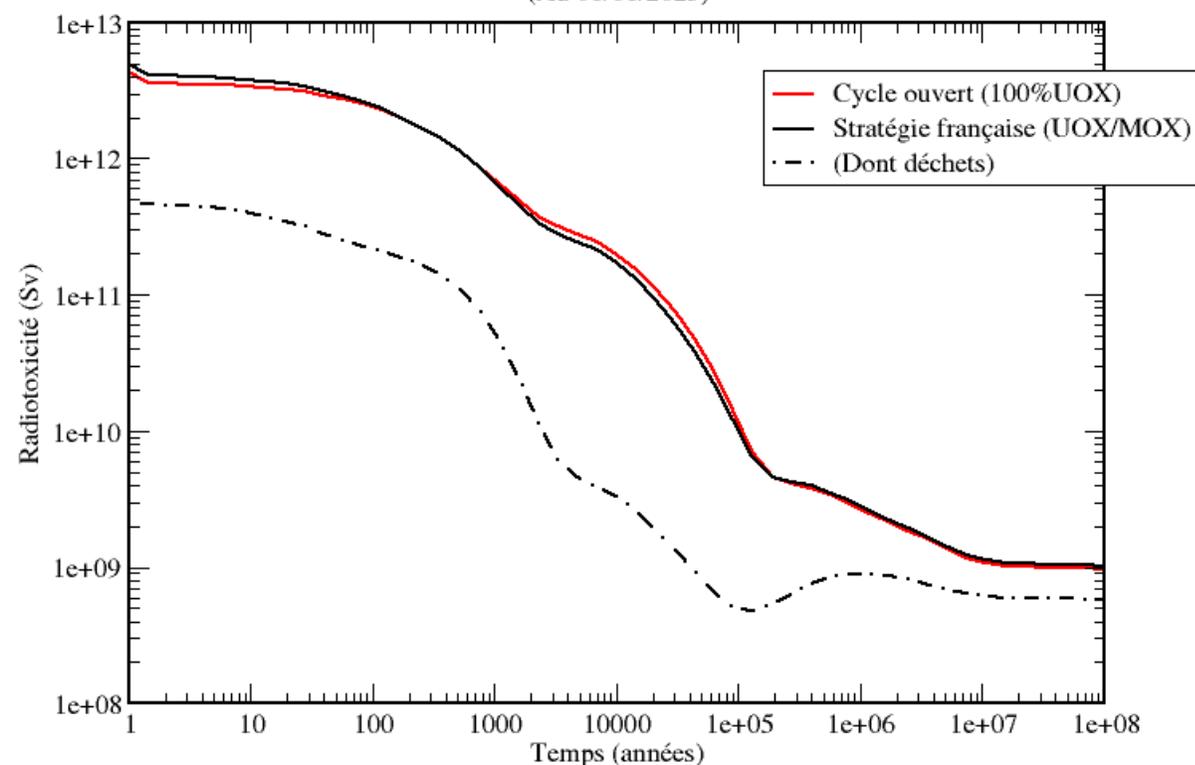


Evolution des matières dans le parc français



Radiotoxicité des matières et déchets pour le parc Français

(Au 01/01/2025)



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

PROJET CIGÉO

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

LE DOSSIER DU MAÎTRE D'OUVRAGE
DÉBAT PUBLIC DU 14 MAI AU 19 OCTOBRE 2013



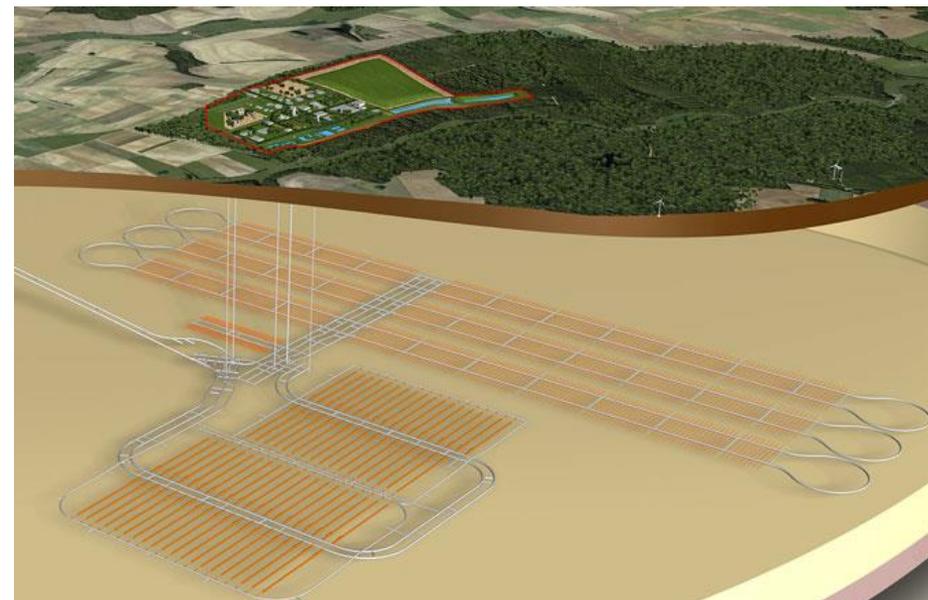
L'inventaire de CIGÉO :

	Déjà engagé*	Après 40 ans avec retraitement	Après 40 ans sans retraitement	Capacité CIGÉO
HA-VL	5 700 m ³	8 000 m ³	93 500 m ³	10 000 m³
MA-VL	57 500 m ³	67 500 m ³	59 000 m ³	70 000 m³

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

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

La surface total représente environ 15 km² à terme

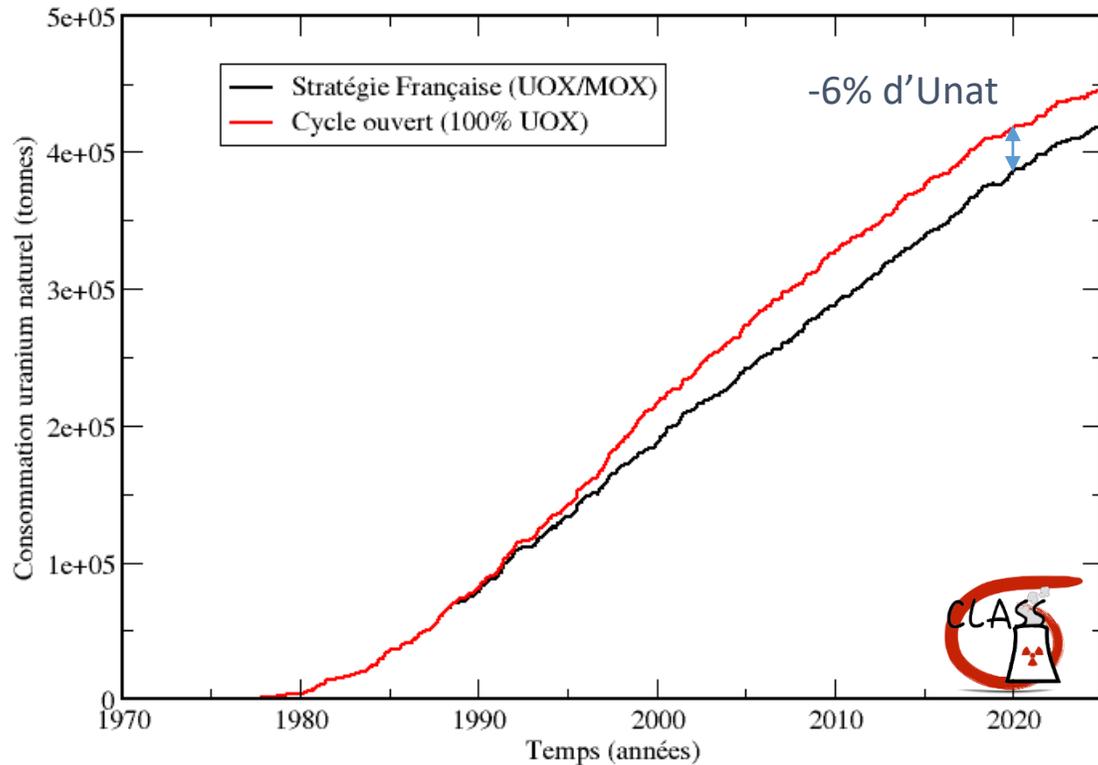


- 5% du total des déchets HA seront installé en 2025 dans CIGÉO pour observation pendant 50 ans.
- Le stockage des HA ne débutera donc pas avant 2075 !

Le cycle du combustible

L'économie d'uranium

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

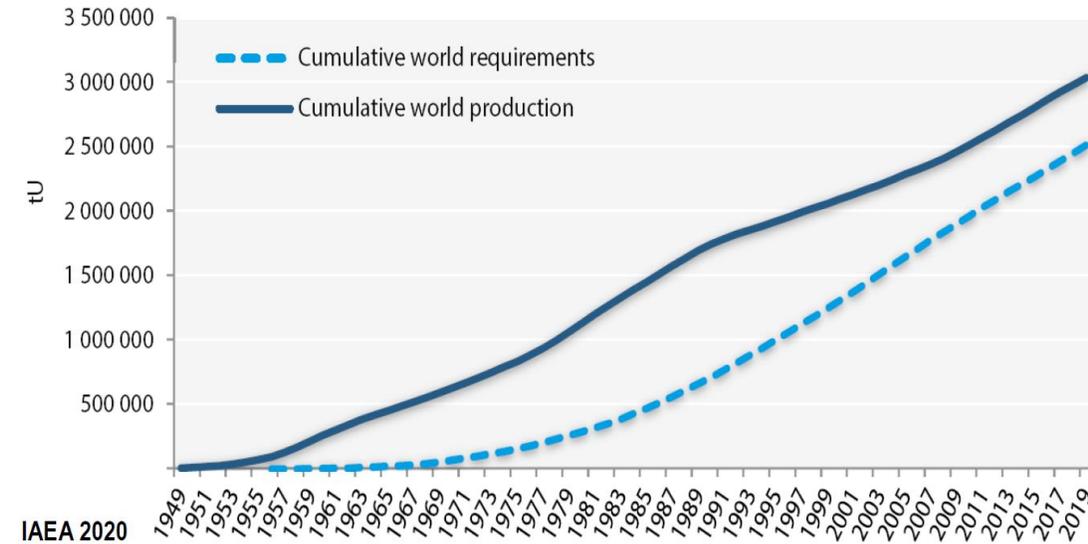


- Etats des ressources mondiales (conventionnelles) :

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

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

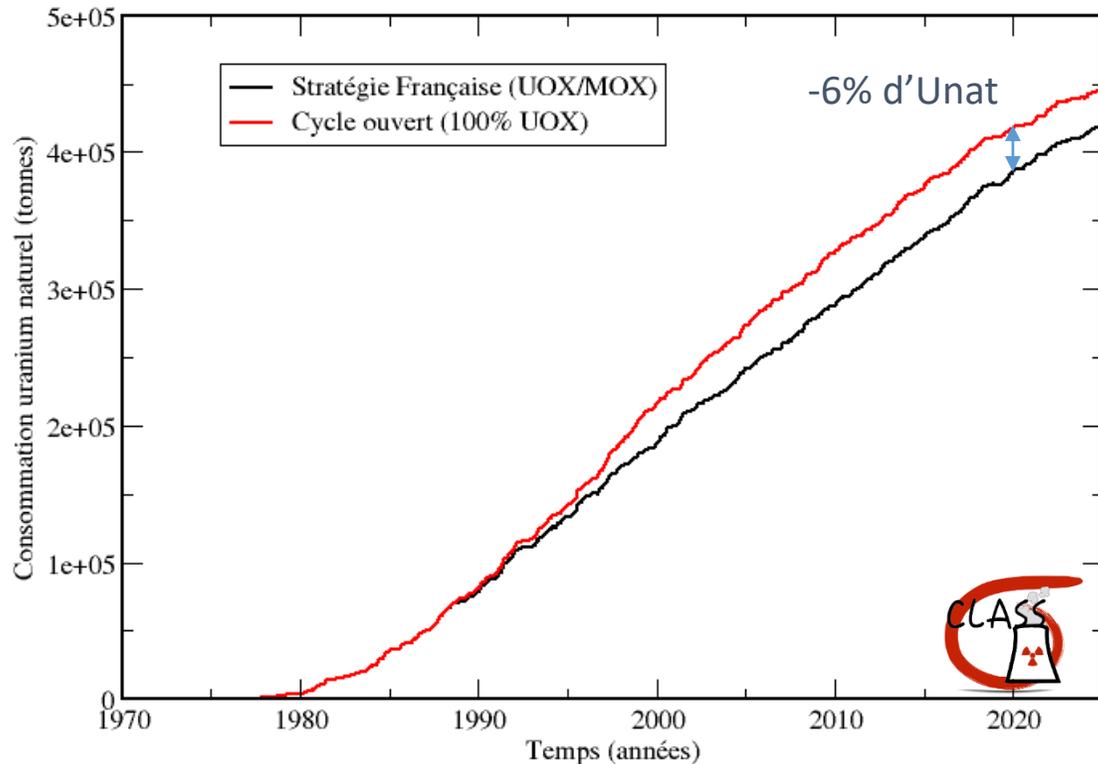
- Phosphates ~ 9 000 kt
- Autres ~ 22 000 kt (cités dans le livre rouge AIEA)



Le cycle du combustible

L'économie d'uranium

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



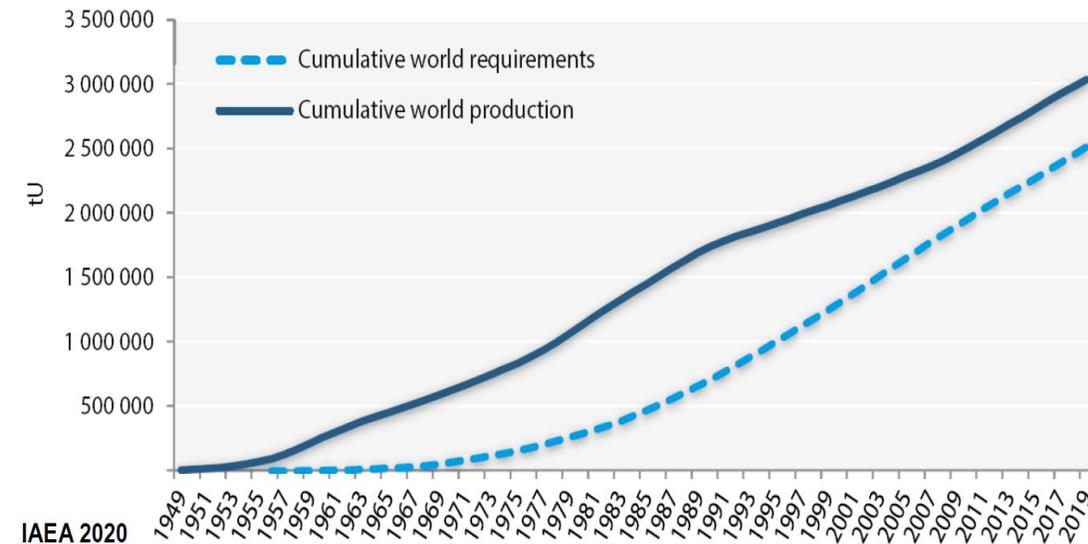
« Des **ressources suffisantes** en uranium ont été **identifiés** pour soutenir les **scénarios de déploiement** du nucléaire au niveau mondial **les plus agressifs**, mais très peu de mines sont compétitifs au prix actuel » *Michel Cuney, (JA, GDR SciNEE)*

- Etats des ressources mondiales (conventionnelles) :

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

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

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



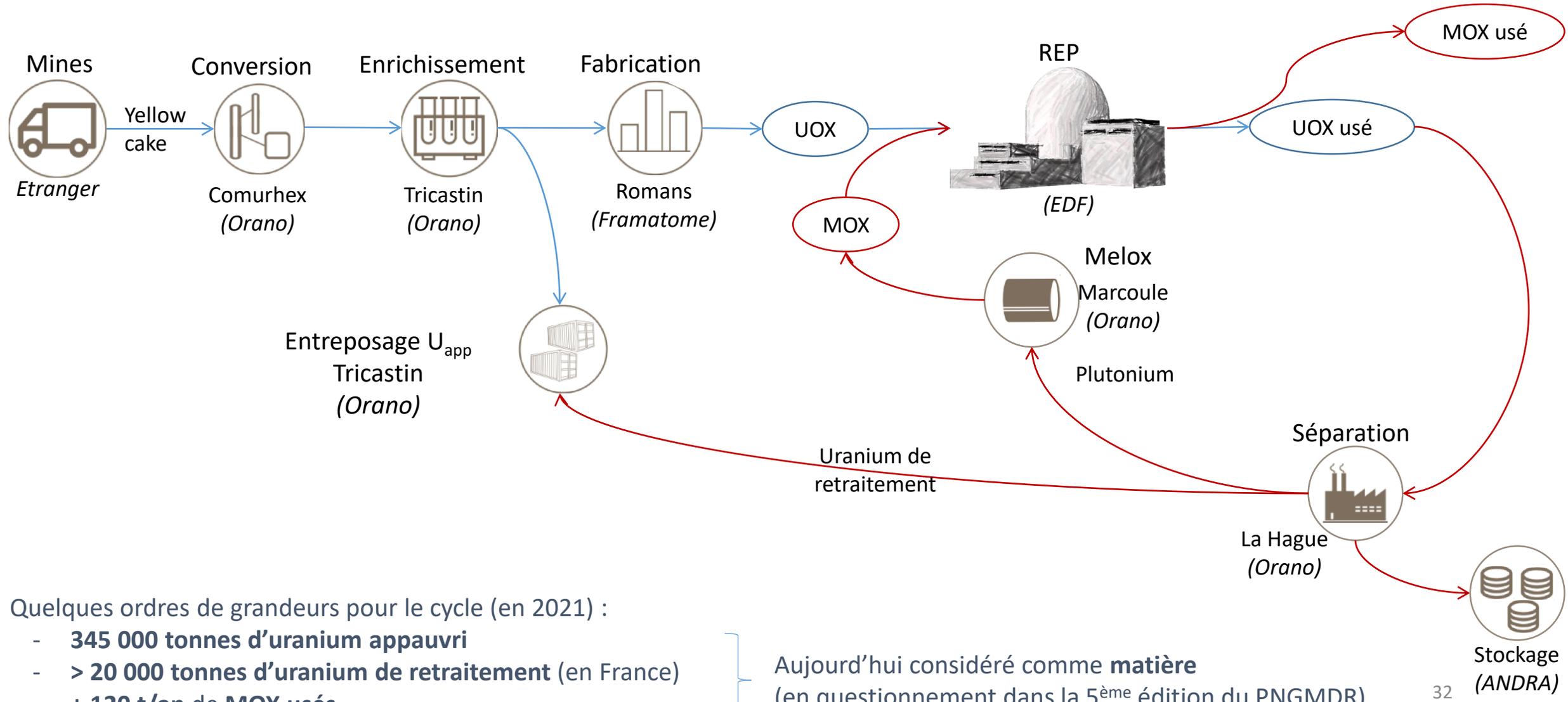
1. Fonctionnement des réacteurs
 - ✓ Principe de la réaction en chaîne
 - ✓ L'importance de la thermalisation des neutrons
 - ✓ Présentation d'un REP
 - ✓ L'évolution du combustible

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

3. **Les enjeux pour le parc à l'échéance 2050**
 - ✓ **La « crise » des piscines**
 - ✓ **Le moxage des REP 1300**
 - ✓ **Le Multi-recyclage du plutonium**
 - ✓ **EPR vs EPR2**
 - ✓ **CIGEO : projet de stockage des déchets HA-VL**

Les enjeux pour le parc

Quelques points durs



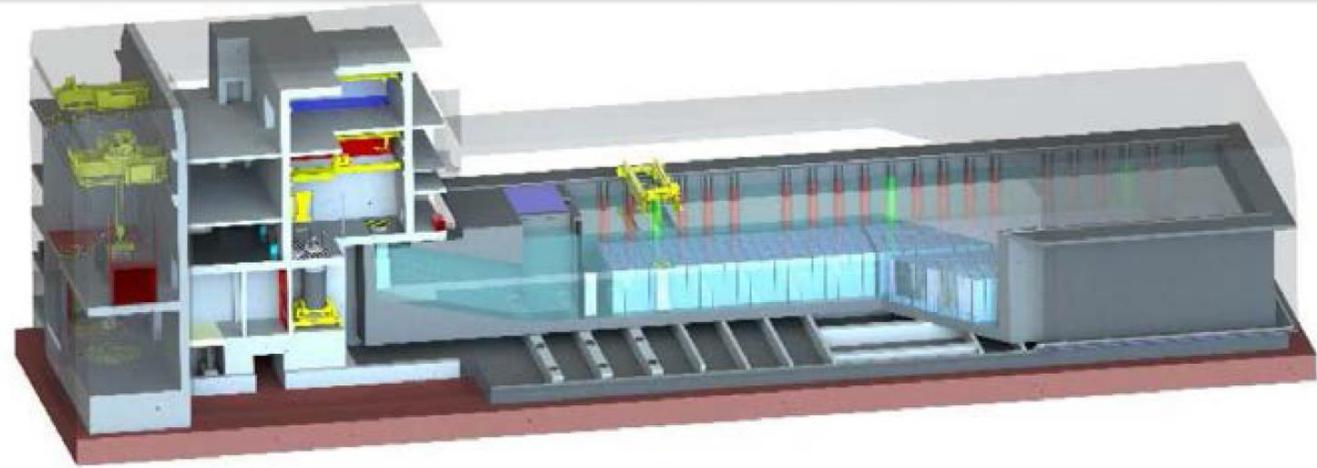
- Quelques ordres de grandeurs pour le cycle (en 2021) :
 - **345 000 tonnes d'uranium appauvri**
 - **> 20 000 tonnes d'uranium de retraitement (en France)**
 - **+ 120 t/an de MOX usés**

Aujourd'hui considéré comme **matière**
 (en questionnement dans la 5^{ème} édition du PNGMDR)

Les enjeux pour le parc

La « crise » des piscines

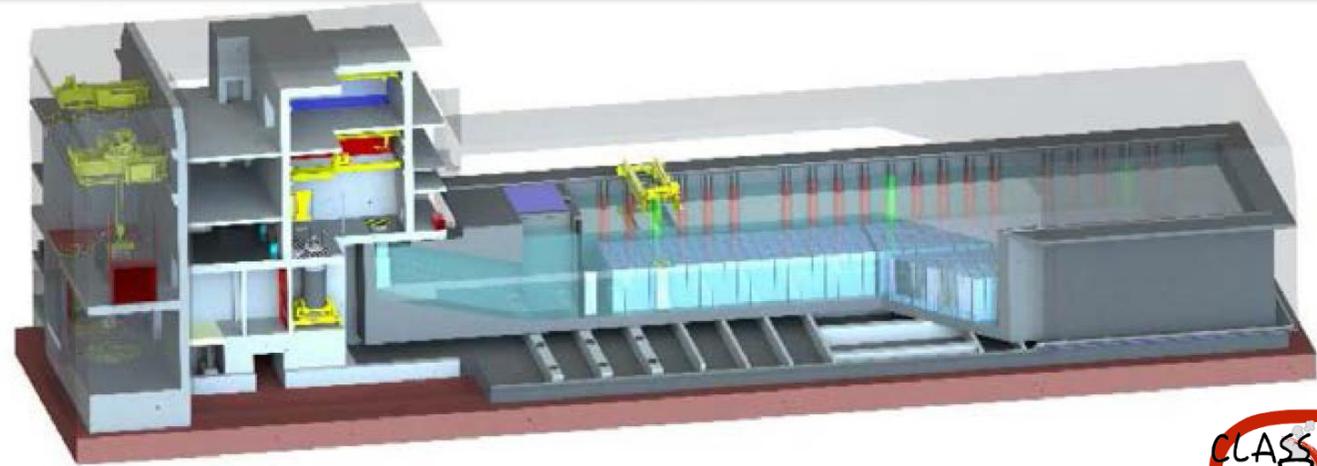
- **Saturation des piscines d'ici 2030** (estimé en 2018)
 - 2018 : Début du projet de nouvelle piscine
 - Amélioration de la sûreté :
 - Chute d'avion*
 - Aléas climatique « extrême »*
 - Durée d'exploitation > 100 ans
 - La piscine ne sera pas en exploitation avant 2034 !



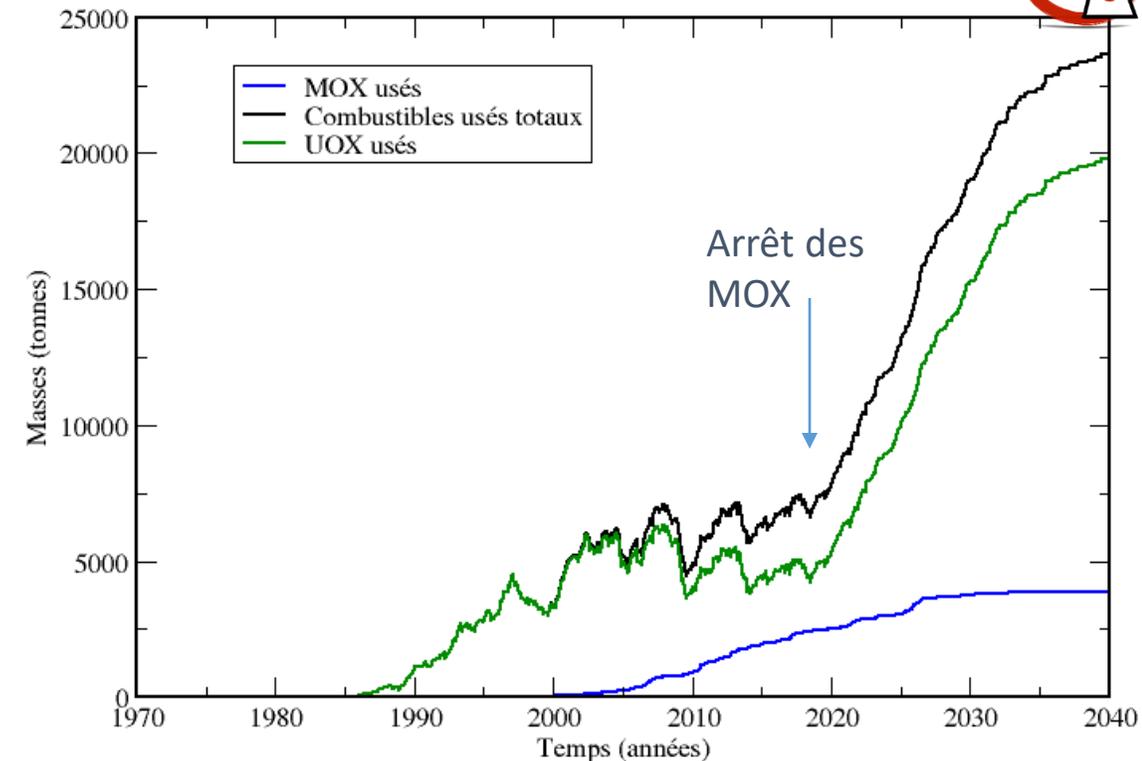
Les enjeux pour le parc

La « crise » des piscines

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



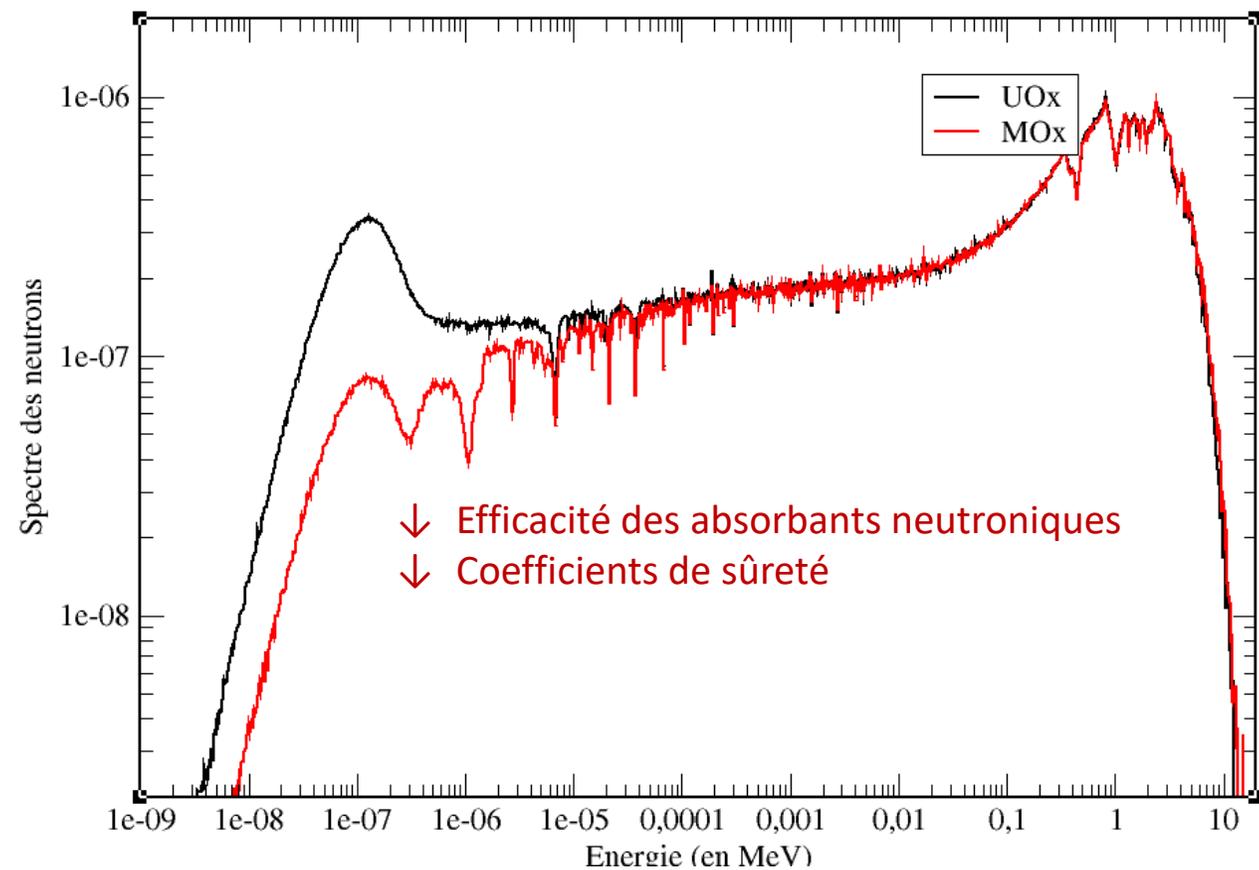
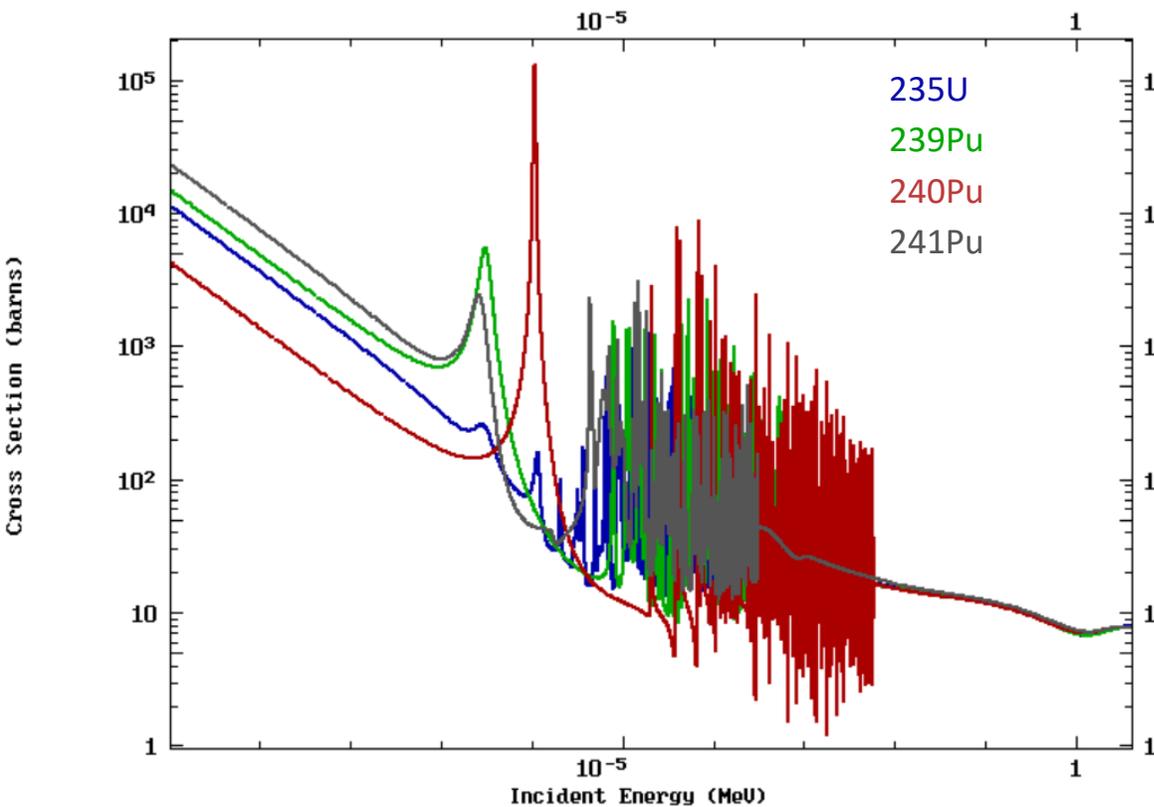
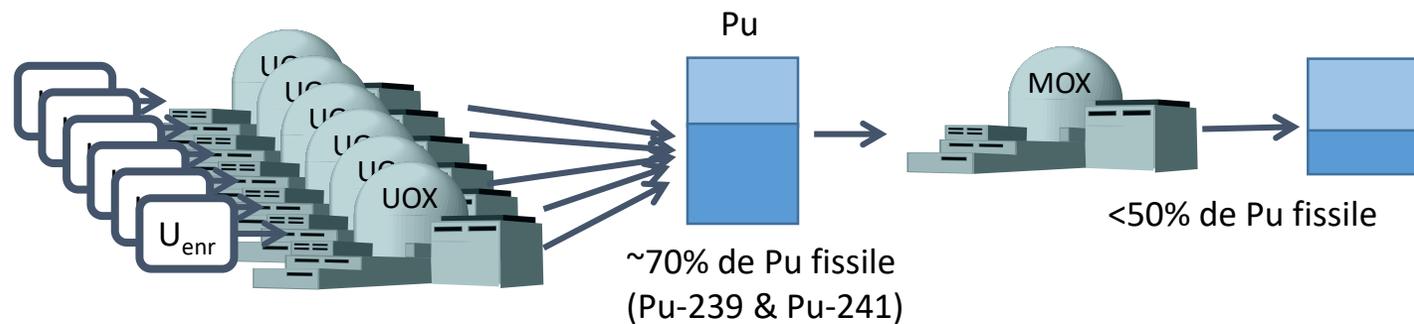
- Mais la PPE prévoit l'arrêt de réacteurs
 - 20 tranches autorisés à recevoir du combustible MOX
 - REP 900 (CPY) démarrés entre 1980 et 1987**
 - *Fin du retraitement d'une partie des assemblages UOX*
- La saturation des piscines arrivera avant 2030
 - *Densification des piscines de la Hague (dossier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



Les enjeux pour le parc

Les difficultés liées au MOX

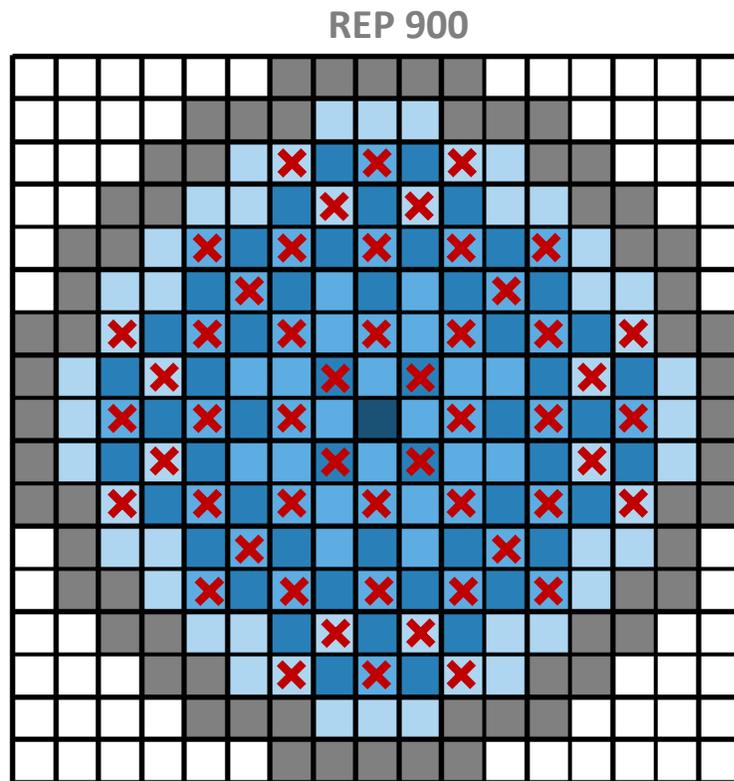
- A cause des isotopes pairs du plutonium, il faut **~7-9%** de **plutonium** dans les combustibles **MOX**
 - ➔ Concentration du plutonium
 - ➔ Spectre neutronique (beaucoup) plus rapide



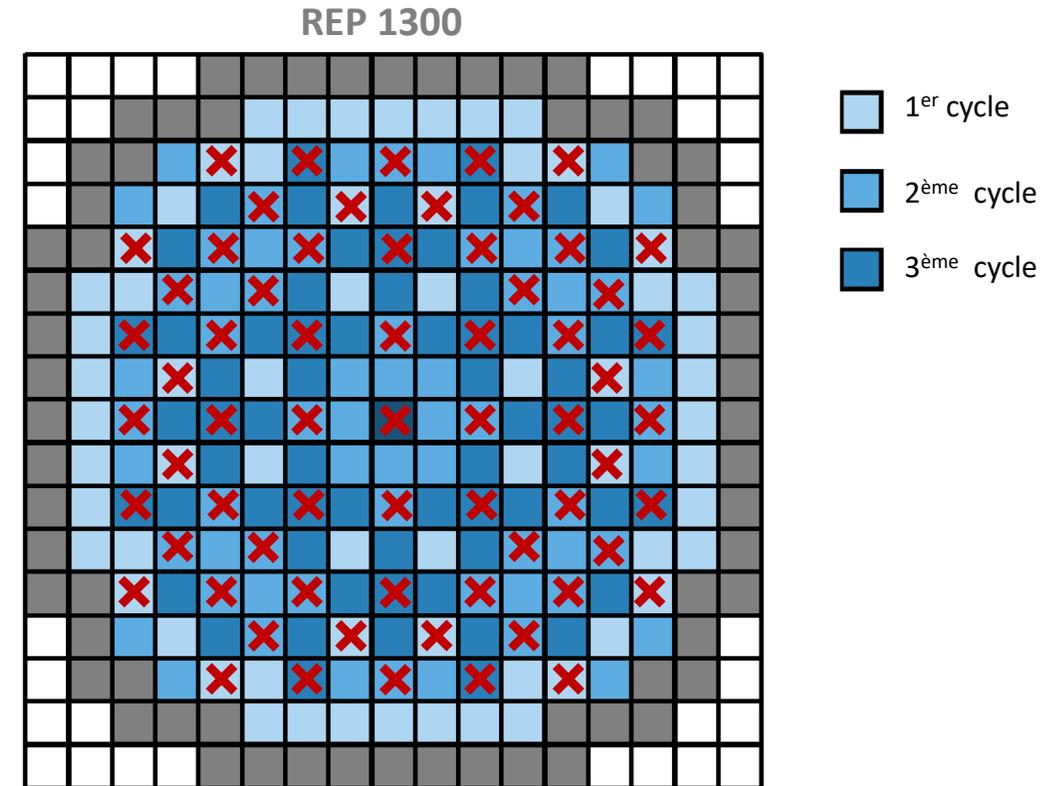
Les enjeux pour le parc

Le MOXage des 1300

- Grosses difficultés pour trouver un **plan de rechargement REP-1300** avec du combustible **MOX**
 - Les MOX ne peuvent pas être sous-grappe
 - Nappe de puissance stable (sans « tilt ») et uniforme



157 Assemblages → ~12 - 15 MOX par recharge
Hauteur combustible ~3,7m



193 Assemblages → ~16 - 20 MOX par recharge
Hauteur combustible ~4,3m

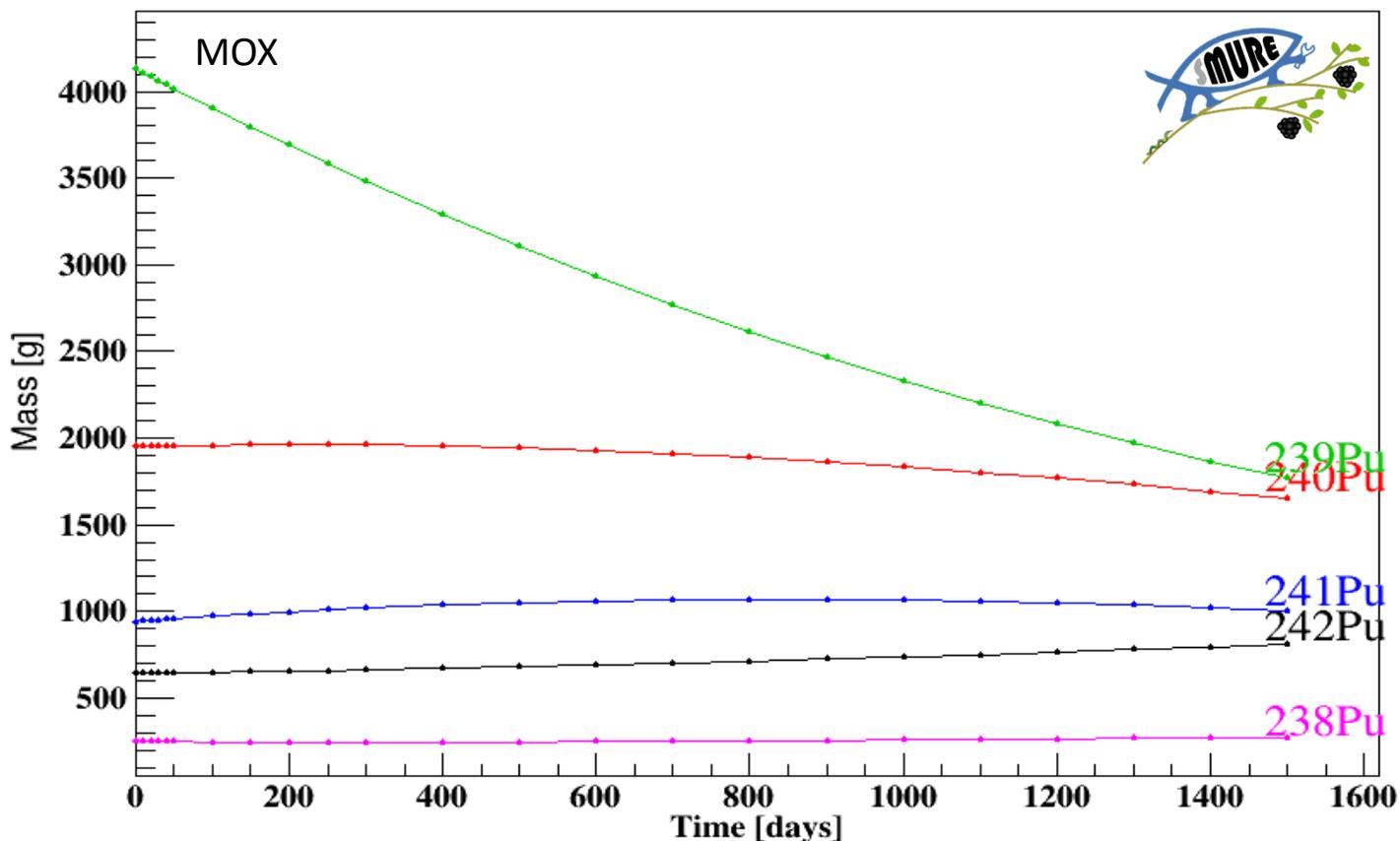
1^{er} cycle
2^{ème} cycle
3^{ème} cycle

- Limitation des capacités de suivi de charge avec des réacteurs MOXés
- **Les usines de fabrications et les unités de transport ne sont pas dimensionnés pour les assemblages REP 1300**

Les enjeux pour le parc

Les difficultés liées au MOX

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



→ On brûle essentiellement du plutonium 239

- ⇒ dégradation forte de la qualité
- ⇒ Augmentation de la teneur pour un nouveau passage en réacteur
- ⇒ dégradation des coefficients de sûreté

- Mais la valorisation des **MOX** est **nécessaire** pour que ceux ne soit **pas considéré comme des déchets** (5^{ème} PNGMDR)
- Et les **REP** sont les **seuls réacteurs** existants à court/moyen terme **pour une utilisation du plutonium**

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

- Nombreuses modifications pour les réacteurs et le cycle
- Assemblage de test à l'horizon 2028 pour un déploiement industriel à l'horizon 2050

Projet MRREP
Cf. exposé C. Chabert

Les enjeux pour le parc

EPR2

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

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

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

Concertation publique +
parlementaire (nouvelle PPE)

2028 : Début
du chantier

2035 : Mise en service des
premiers réacteurs

2022

2030

2035

2040

2045



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

- Simplification du génie civil

- Normalisation des équipements (notamment hydraulique)

- **Suppression de l'option maintenance en puissance**

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

- Construction par paire

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

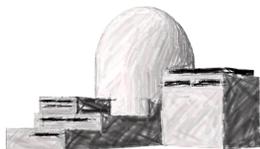
} Réduction du coût

} **Simplification de la maintenance**

} Simplification du chantier

- Le challenge EPR est avant tout un challenge financier

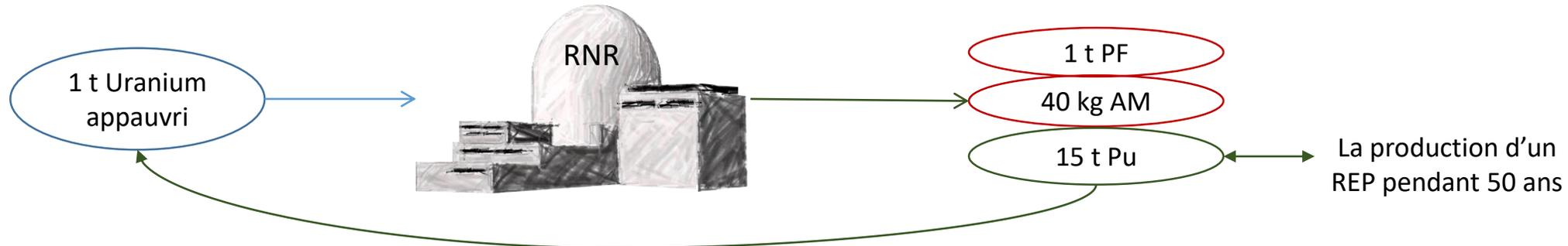
- Les coûts du nucléaires sont portés par les coûts du capital



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



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



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

➤ Quelques messages à retenir :

- La **temporalité** de la transition **énergétique**, couplée à celle du nucléaire, impose les réflexions avec les **technologies actuelles** :
 - Piscine pour les combustibles usés : >16 ans
 - EPR de Flamanville (FA3) : >16 ans (de construction)
 - EPR2 (calendrier actuel) : >13 ans (entre la décision et la construction)

- Le **renouvellement** du parc, ainsi que **l'extension** de la durée de **vie du parc actuel**, est **nécessaire**
 - Associé à un besoin de « flexibilité » (suivi de charge)

- La question du **statut du plutonium est centrale**
 - **Ressource** précieuse pour les **réacteurs à neutrons rapides...** qui seront peut être déployé **après 2080**
 - Le Pu concentre la majeure partie de la **radiotoxicité de l'inventaire**

- La **temporalité de l'électronucléaire** complique la **gestion** du plutonium
 - Les conclusions du débat publique associé au 5^{ème} **PNGMDR** ne sont pas compatibles avec cette temporalité
Remise en question du statut des MOX usés si pas d'utilisation planifié avec le parc actuel (et de l'Uapp et URT)

- **Utilisation du plutonium et de l'uranium de retraitement dans les scénarios actuels**
 - Enjeux de R&D sur les réacteurs et sur le combustible
 - Temporalité associée au renouvellement des installations du cycle (notamment MELOX)