

Energie nucléaire du futur : Quels enjeux pour la recherche ?

(au CNRS/Université, en physique...)

ECOCLIM 2018
11 - 14 juin ; Orsay

*Xavier Doligez
Institut de Physique Nucléaire d'Orsay
doligez@ipno.in2p3.fr*

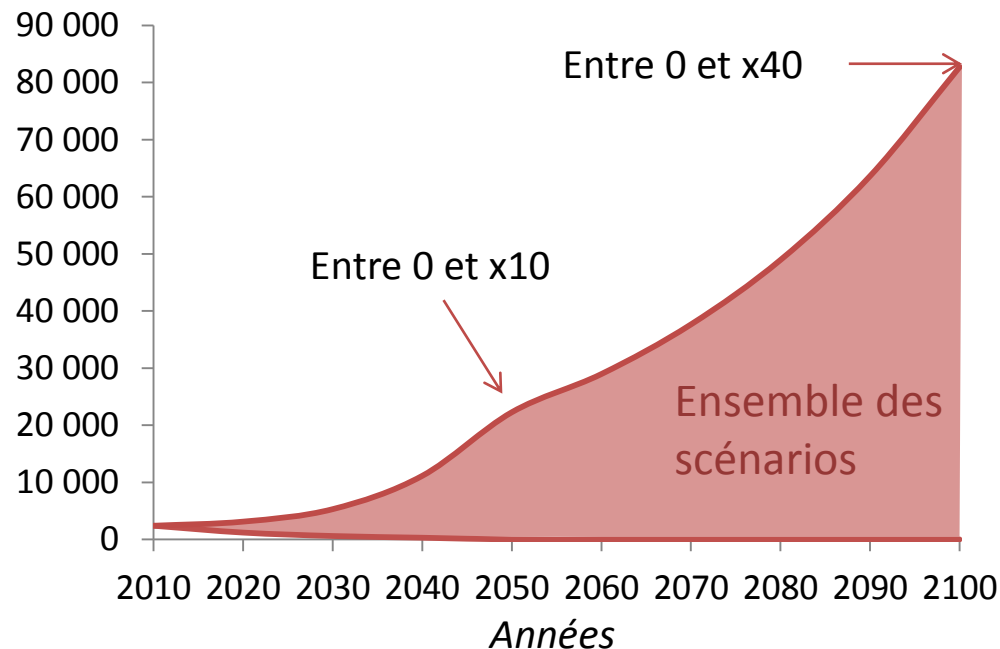
Le nucléaire : une énergie qui fait débat

➤ Ce qui n'est pas soumis au débat :

- **Une population mondiale en augmentation (+ 200 000 hab/j !)**
→ Une augmentation de la consommation d'énergie mondiale
- **Un réchauffement climatique**
→ Recommandation AIE :
1/ Efficacité/sobriété
2/ Report sur l'électricité → Décarbonation des vecteurs d'énergie

➤ Quelle place pour le nucléaire dans les scénarios énergétiques ?

TWh produits par an



→ Nucléaire =

- 0g/CO2 en fonctionnement
- Pilotable

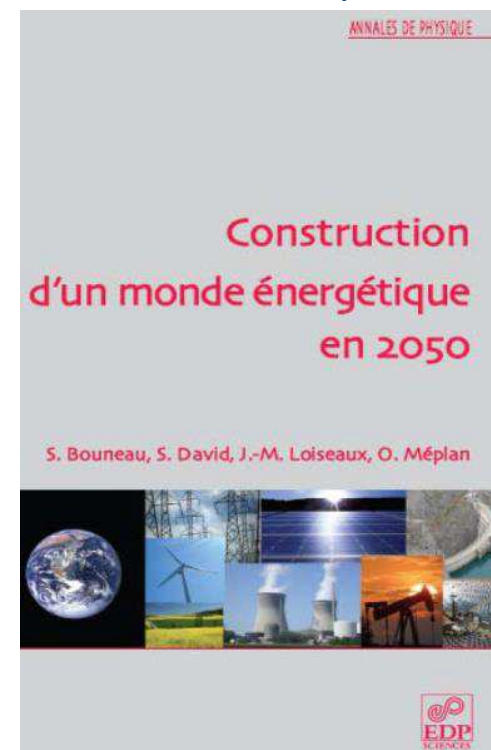
... mais ...

→ Nucléaire =

- Déchets
- Accidents

Pourquoi il y aura un (ou des) futur(s) pour l'énergie nucléaire ?

➤ Retour sur la présentation de S. Bouneau

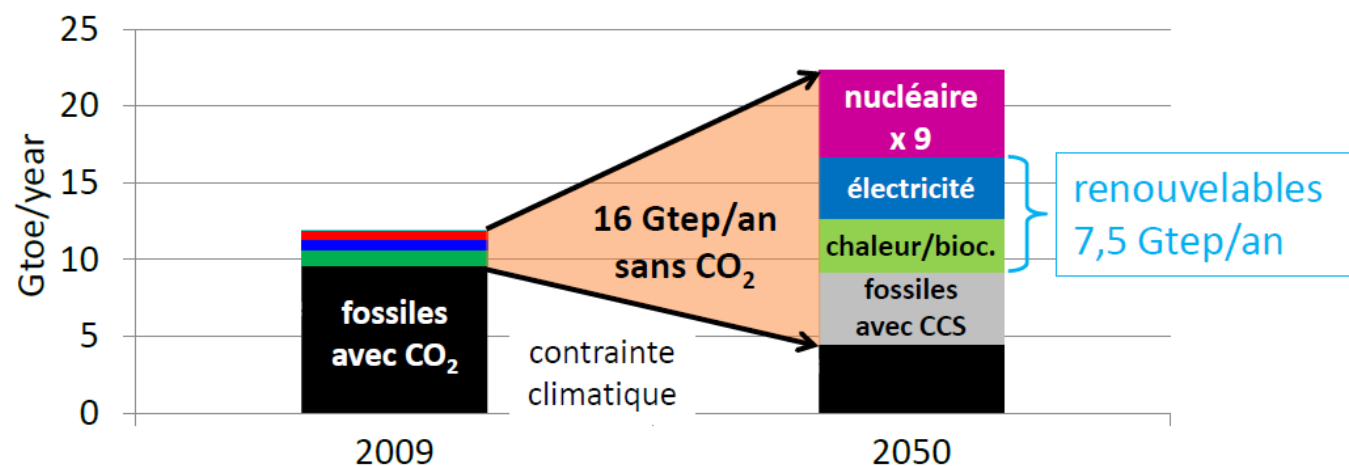


Hypothèses : 3 contraintes

- Climat (*limitation 2°C*)
- Production d'énergie (*20 Gtep*)
- Une répartition des consommations (*Clefs de conso 4/2/1*)

Variable d'ajustement :

- Part du nucléaire en 2050



➤ Facteur 10 irréaliste ?

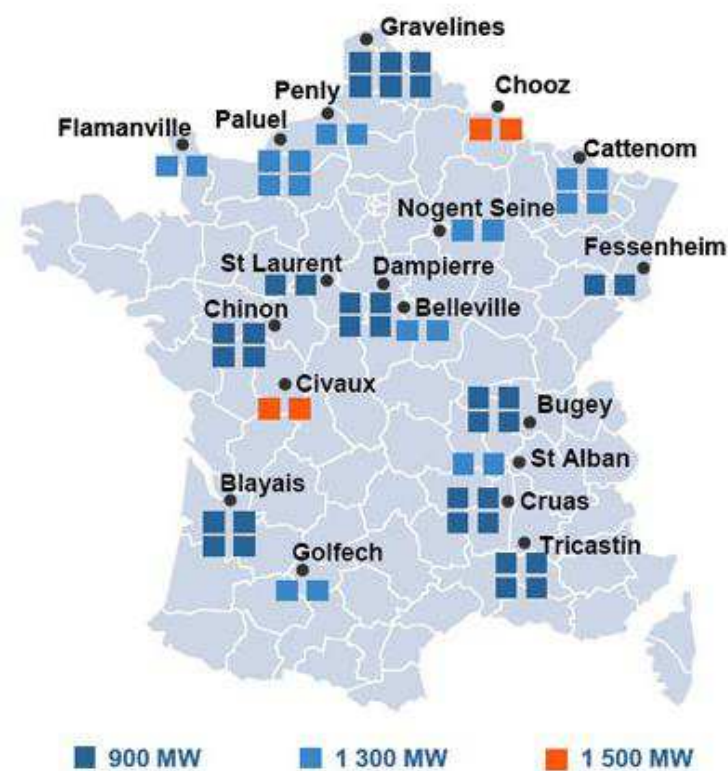
→ Si la Chine se nucléarise comme la France, le facteur 10 est un minimum

Pays développés	Chine	France (Aujourd'hui)
4400 kWh/an/hab	2400 kWh/an/hab	7100 kWh/an/hab

L'énergie nucléaire en France et dans le monde

➤ Dans le monde :

- 19 réacteurs en construction en Chine (raccordement avant 2020)
- ~ 10,5% de l'électricité ; ~ 5% de l'énergie primaire



19 centrales nucléaires
58 tranches
65 millions d'habitants
78% de l'électricité française

Un réacteur fournit
l'électricité de 1,1
millions d'habitants

- Une seule technologie : les réacteurs à eau sous pression (REP)
- Centrale la plus récente : Civaux 2 (1999)
- Centrale la plus vieille : Fessenheim (1&2) (1977)
- 1 réacteur en construction (EPR de Flamanville)
- Jusqu'à 6 nouveaux réacteurs par an

1/ Un minimum de physique des réacteurs

- Criticité et réaction en chaîne
- Ralentissement des neutrons
- Différentes technologies de réacteurs

2/ La problématique du nucléaire : déchets vs ressources

- Qu'est ce qu'un déchet ?
- Le débat CIGEO
- La question du plutonium
- Estimations des ressources et réacteurs du futur

3/ Les scénarios du nucléaire du futur

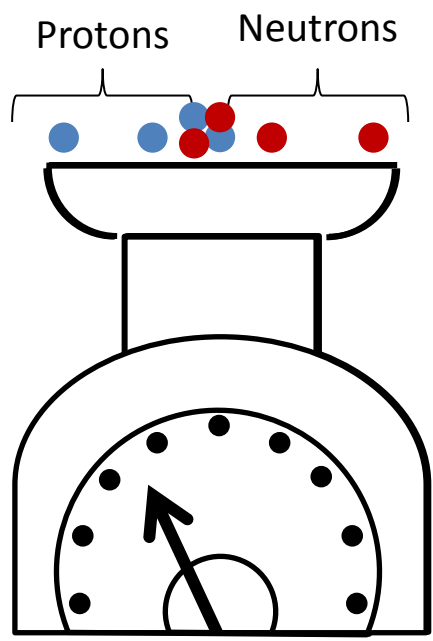
- Le scénario 2015 et la stratégie française
- L'importance de la temporalité

→ *Ce dont nous ne parlerons pas (mais qui reste ouvert au débat, ici ou ailleurs...)*

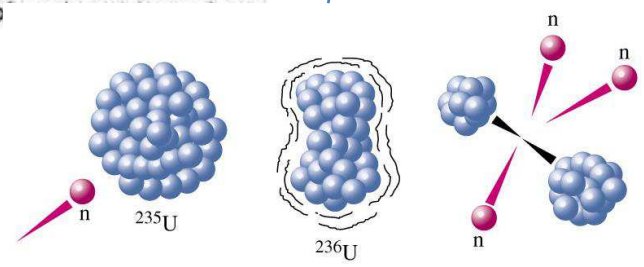
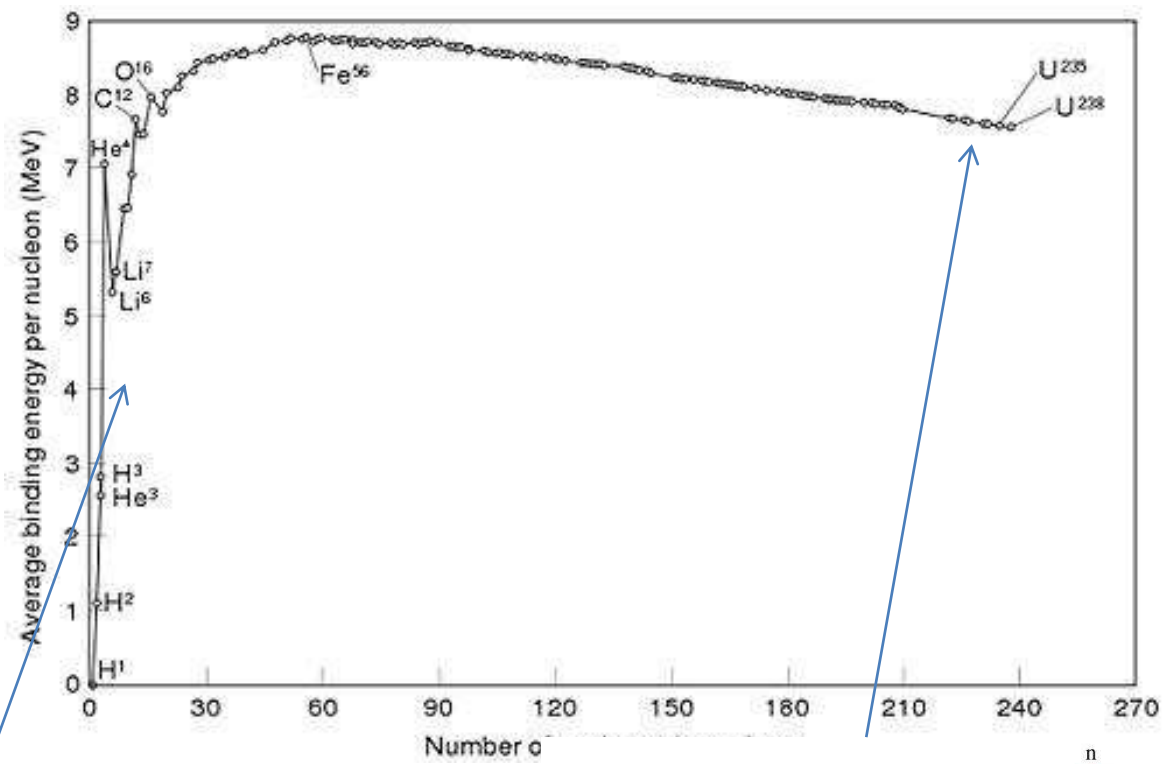
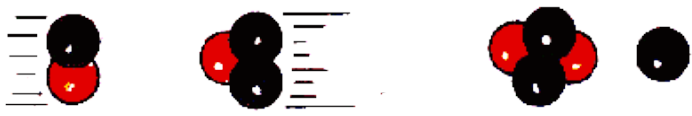
- *Le(s) coût(s) du nucléaire*
- *Les accidents / la sûreté*
- *La gouvernance et le processus de décision*

L'énergie contenue dans les noyaux

➤ Les différentes formes de l'énergie nucléaire



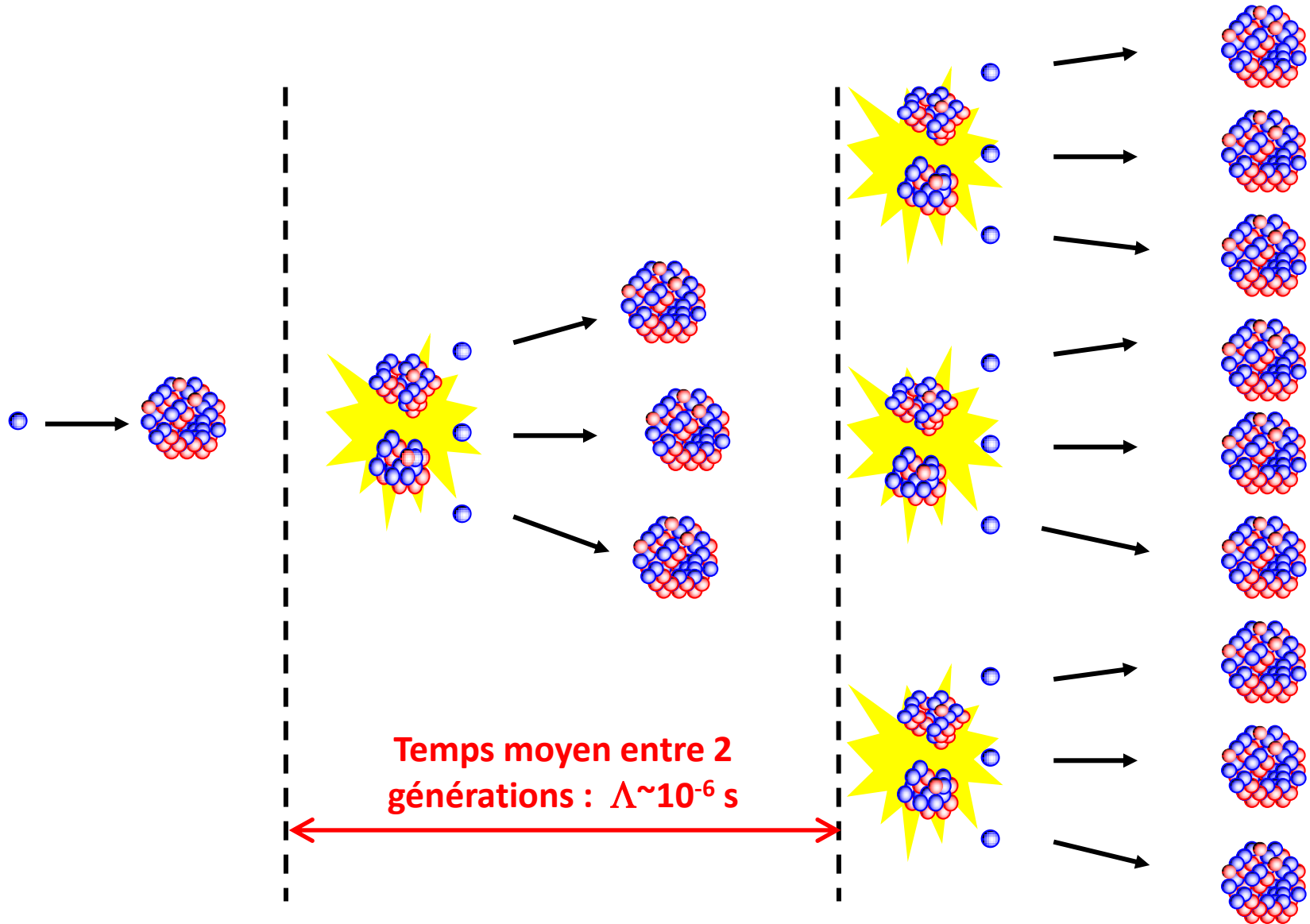
Le défaut le masse quantifie la liaison des nucléons dans le noyau



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

La fission et la réaction en chaîne :

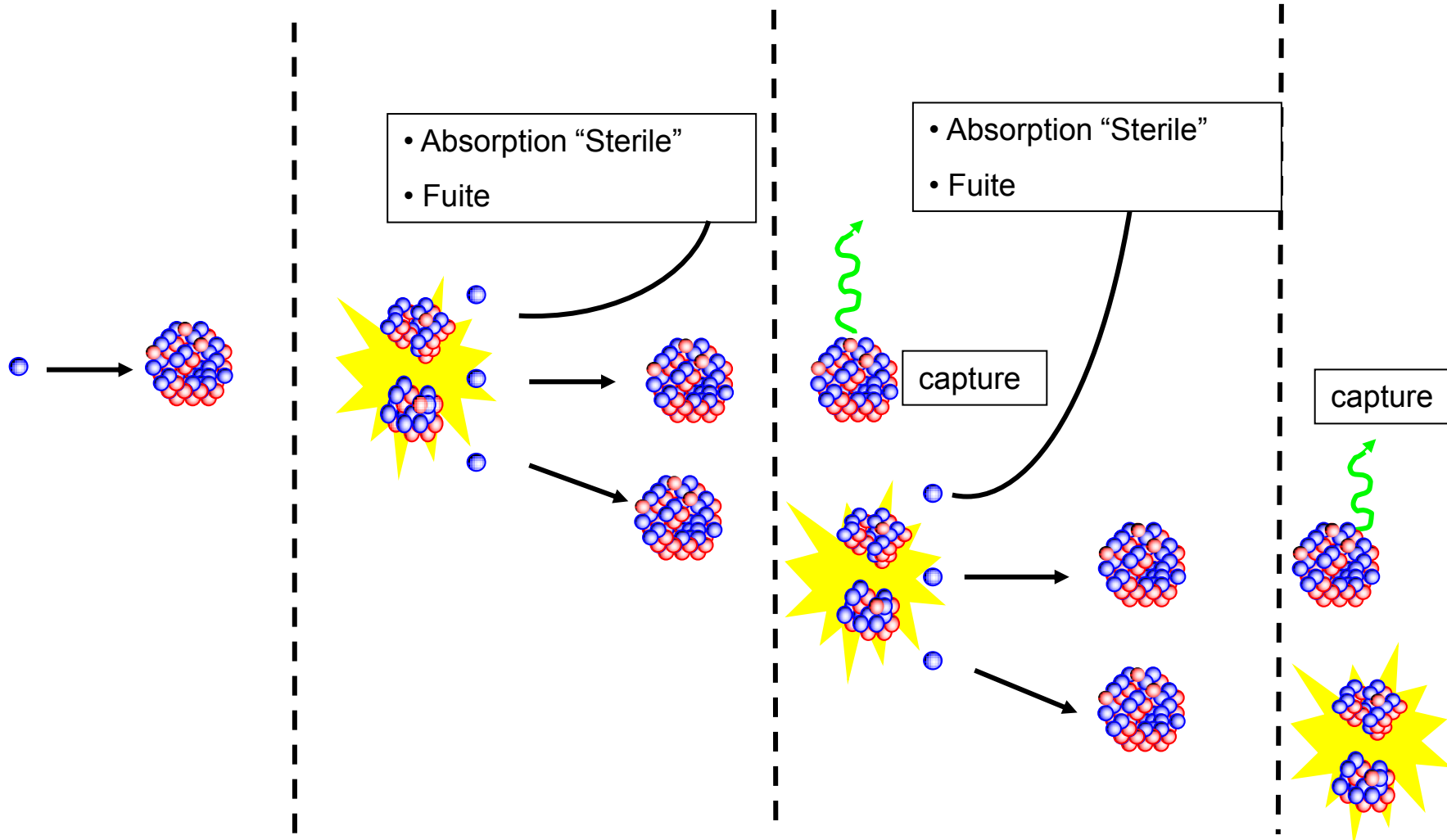
- La fission des noyaux lourds libère entre **2 et 3 neutrons**, produit deux **fragments de fission** et une grande quantité d'énergie (**200 MeV**)



La fission et la réaction en chaîne :

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

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



Réaction stable → Nombre de fission par seconde (= puissance) constant

- Le coefficient de multiplication : une observable de la criticité

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

Taux de réaction + Fuite des neutrons

$$\sum_{\text{isotopes, reactions}} N_i \sigma_i^r \phi + \text{fuites}$$

Taux de fission x Nombre de neutrons émis par fission (ν)

$$\nu \cdot N_f \sigma_f \phi$$

- Les fuites caractérisent la géométrie du système
- Le k_{∞} et donc le ratio des sections efficaces caractérisent la matière

- Deux remarques évidentes

→ La criticité n'est pas dépendante du flux de neutrons (ni de la puissance)

La criticité est dépendante du temps

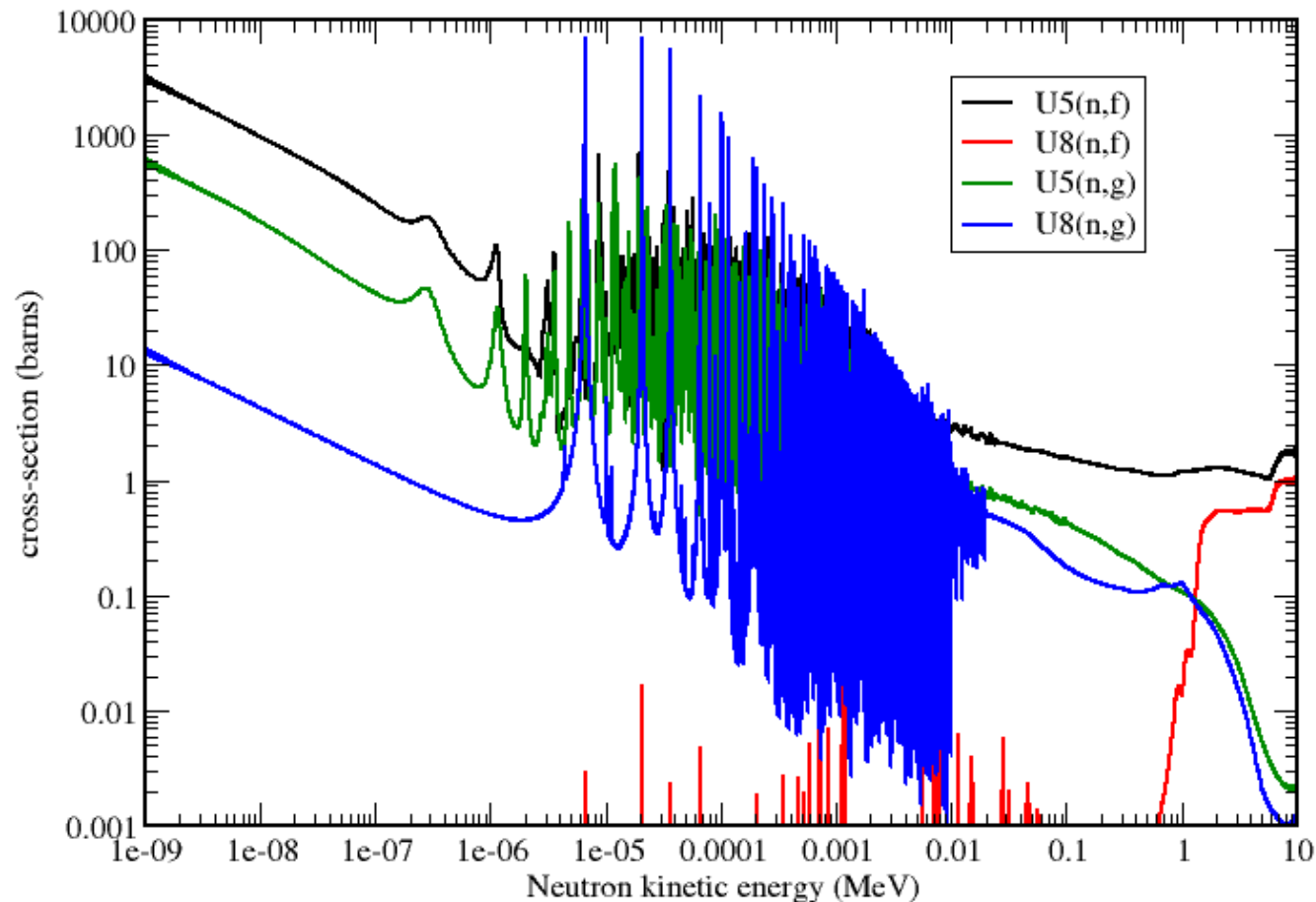
→ La criticité est une grandeur intégrale

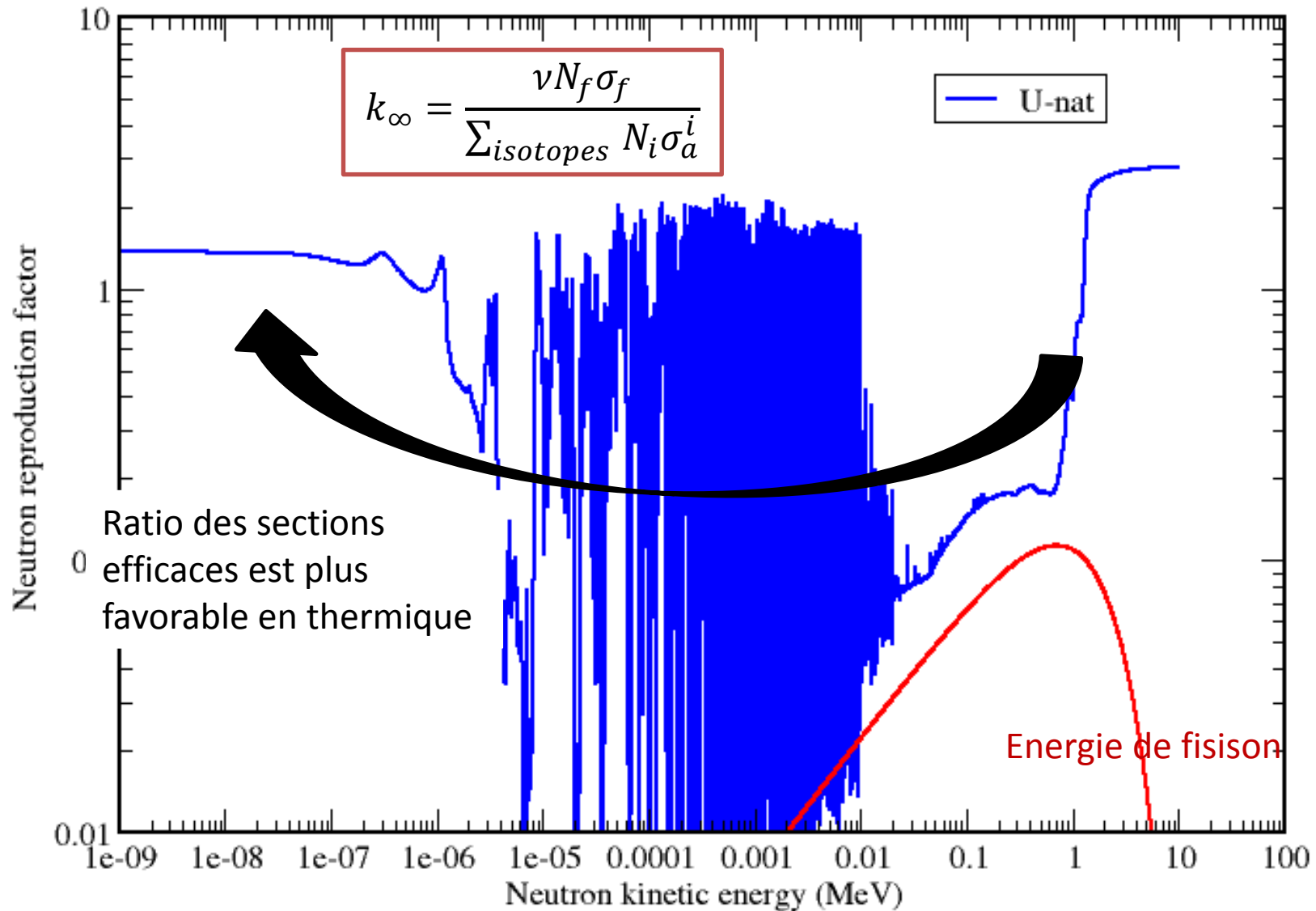
Le concept de "localement critique" n'existe pas

➤ Réacteur critique $\Rightarrow$ *Création des neutrons par fission = disparition des neutrons*

$$k_{\infty} = \frac{\nu N_f \sigma_f}{\sum_{\text{isotopes}} N_i \sigma_a^i}$$

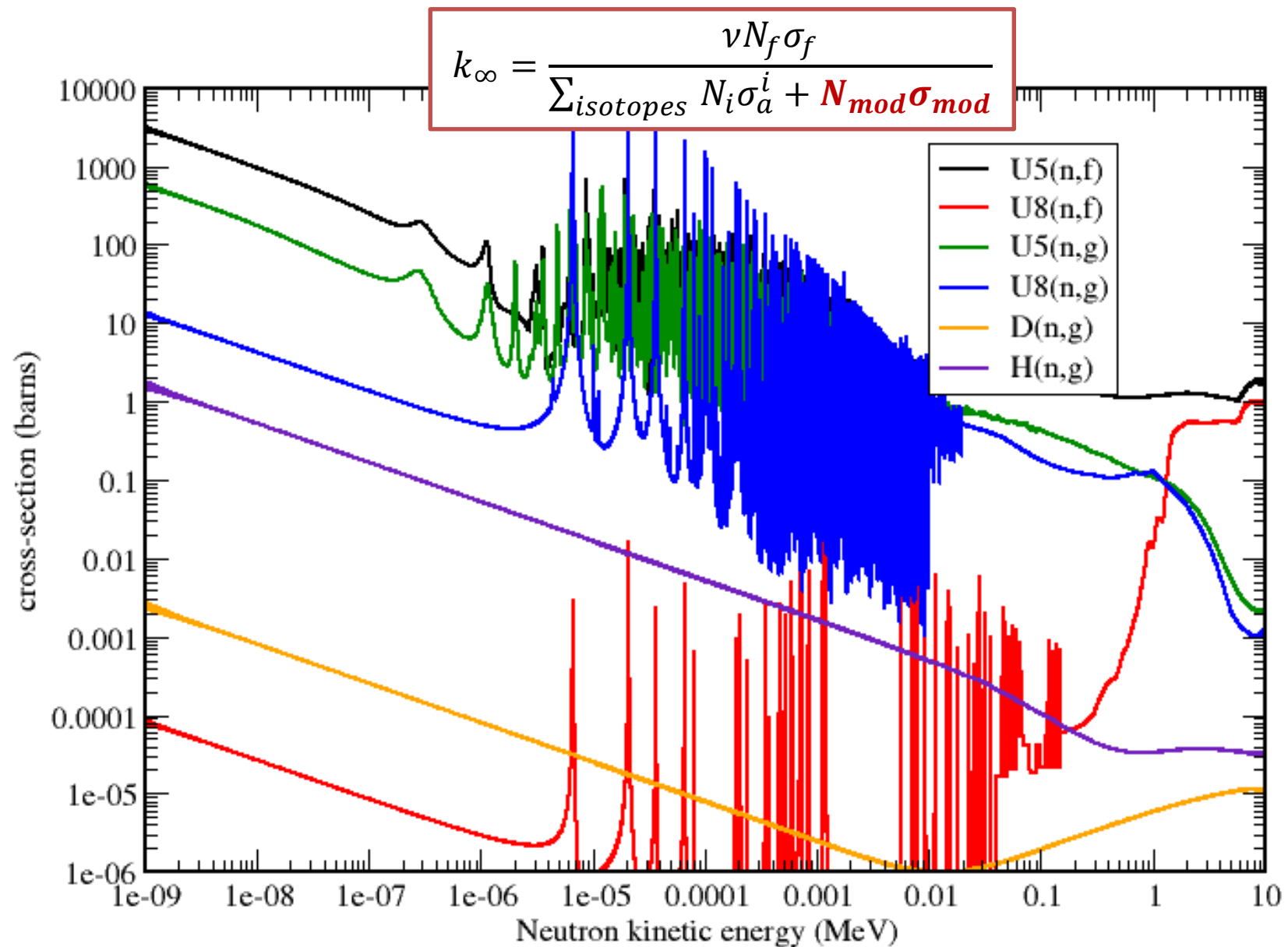
➤ *Seul un isotope fissile naturel : l' ^{235}U qui représente 0,7% de l'Uranium naturel*





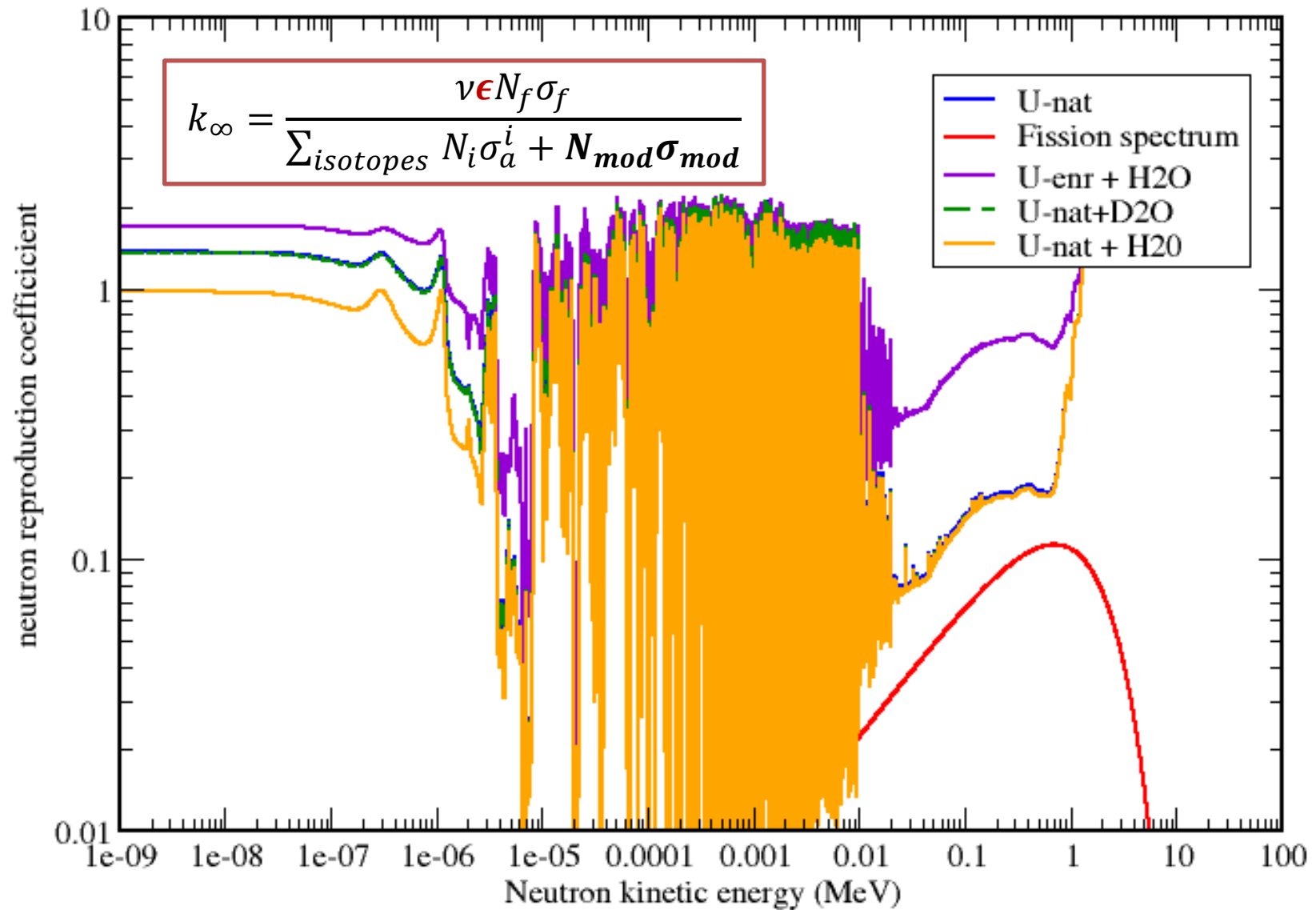
➤ Il n'y a pas de système critique à l'uranium 238

Ralentissement des neutrons grâce au modérateur



➤ Le ralentissement est assurée par diffusion élastique des neutrons sur des noyaux légers

- L'utilisation de l'eau légère comme modérateur impose d'enrichir l'uranium

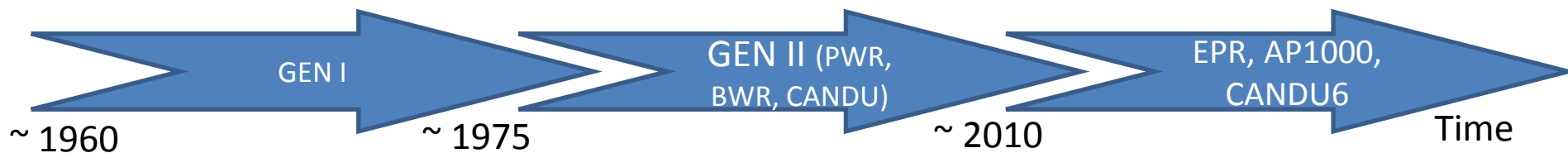
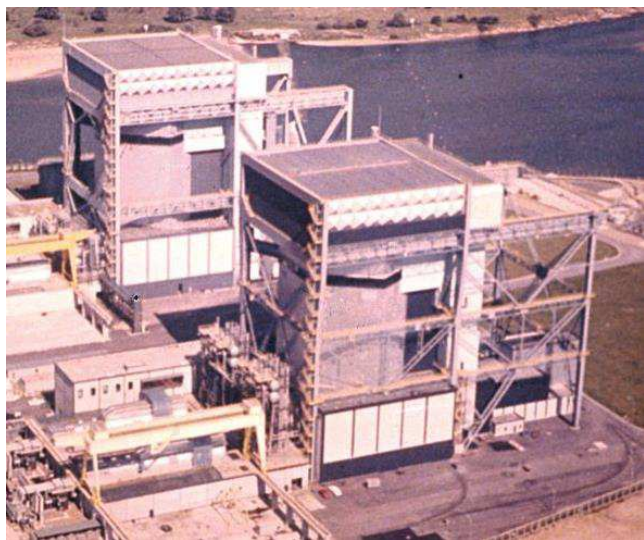


Technologie de réacteur

➤ Résulte d'un compromis entre enrichissement et réacteur

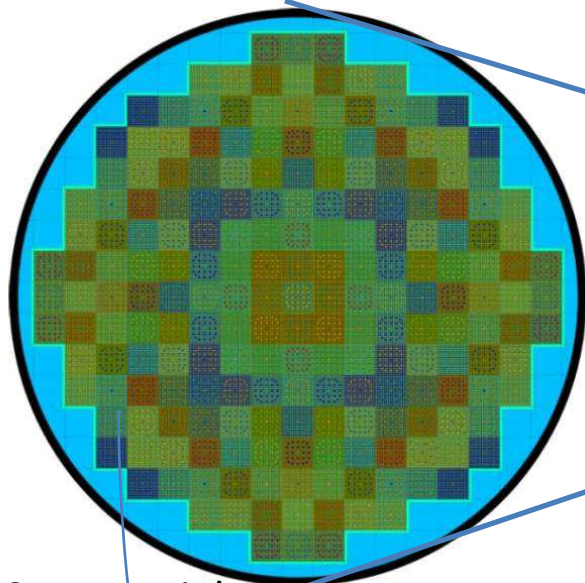
Caloporteur	Gaz (Air, CO2)	Eau légère	Eau lourde	Eau légère
Modérateur	Graphite	Graphite	Eau lourde	Eau légère
Combustible	Uranium naturel	Uranium enrichi	Uranium naturel	Uranium enrichi

Avantage REP → Modérateur = caloporteur

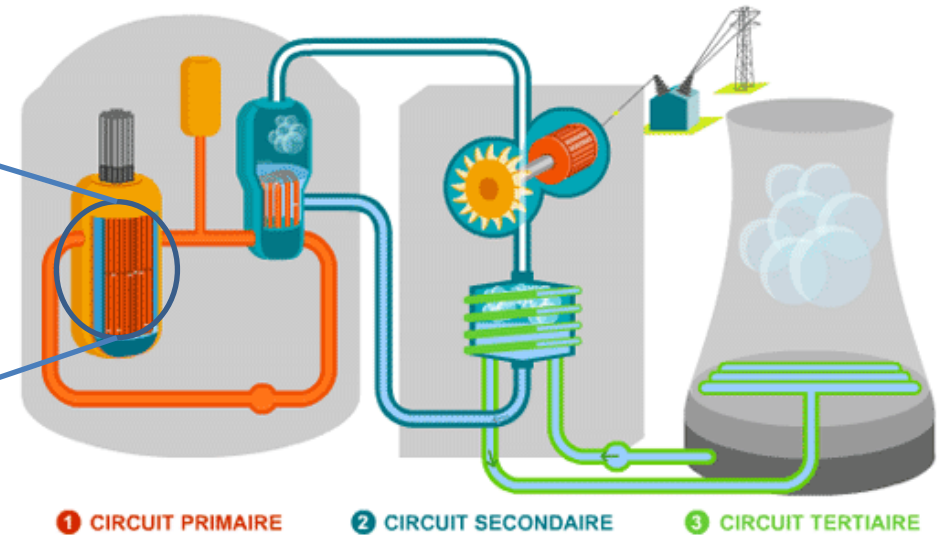


Présentation d'un réacteur

- 81 % des réacteurs dans le monde sont des réacteurs à eau légère (435 réacteurs)
(Boiling Water Reactors ou Pressurized Water Reactors)



Coupe axiale

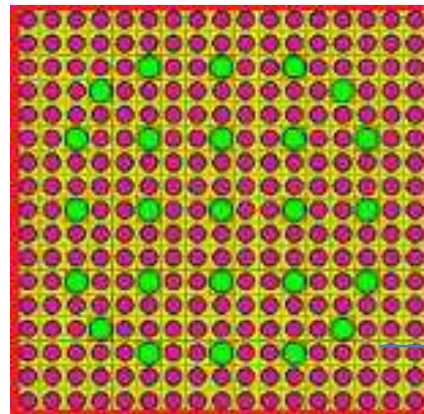
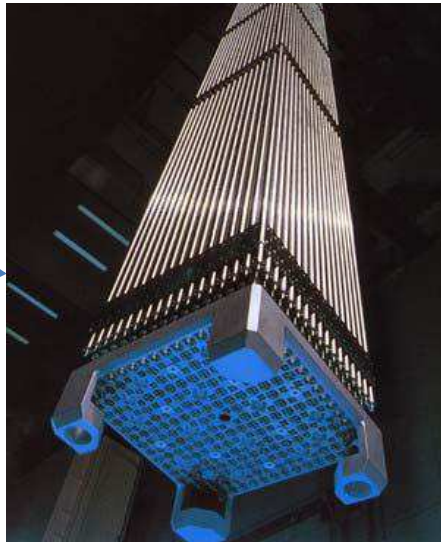


1 CIRCUIT PRIMAIRE

2 CIRCUIT SECONDAIRE

3 CIRCUIT TERTIAIRE

205 fuel
assemblies

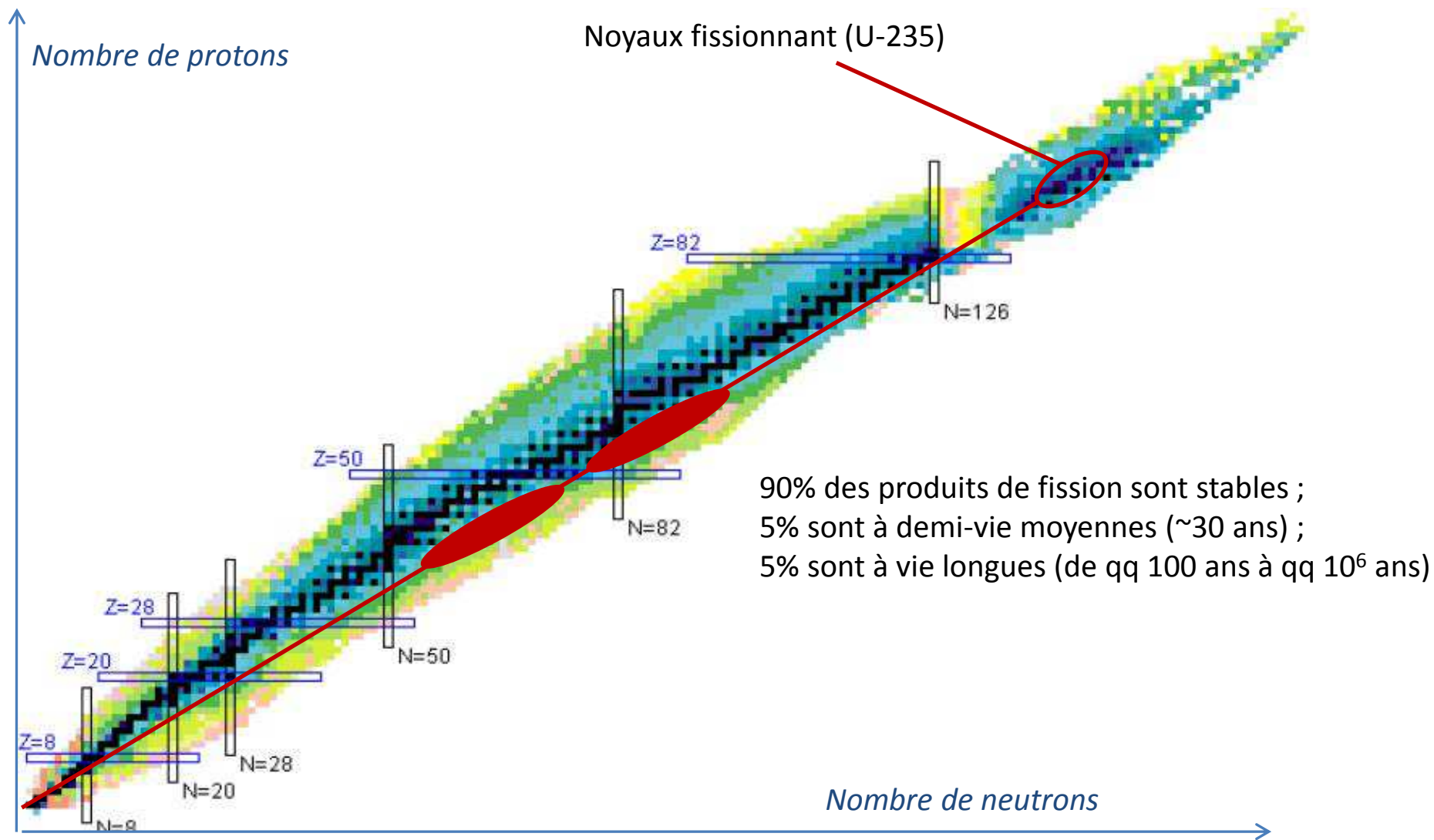


Coupe axiale



264 fuel pins

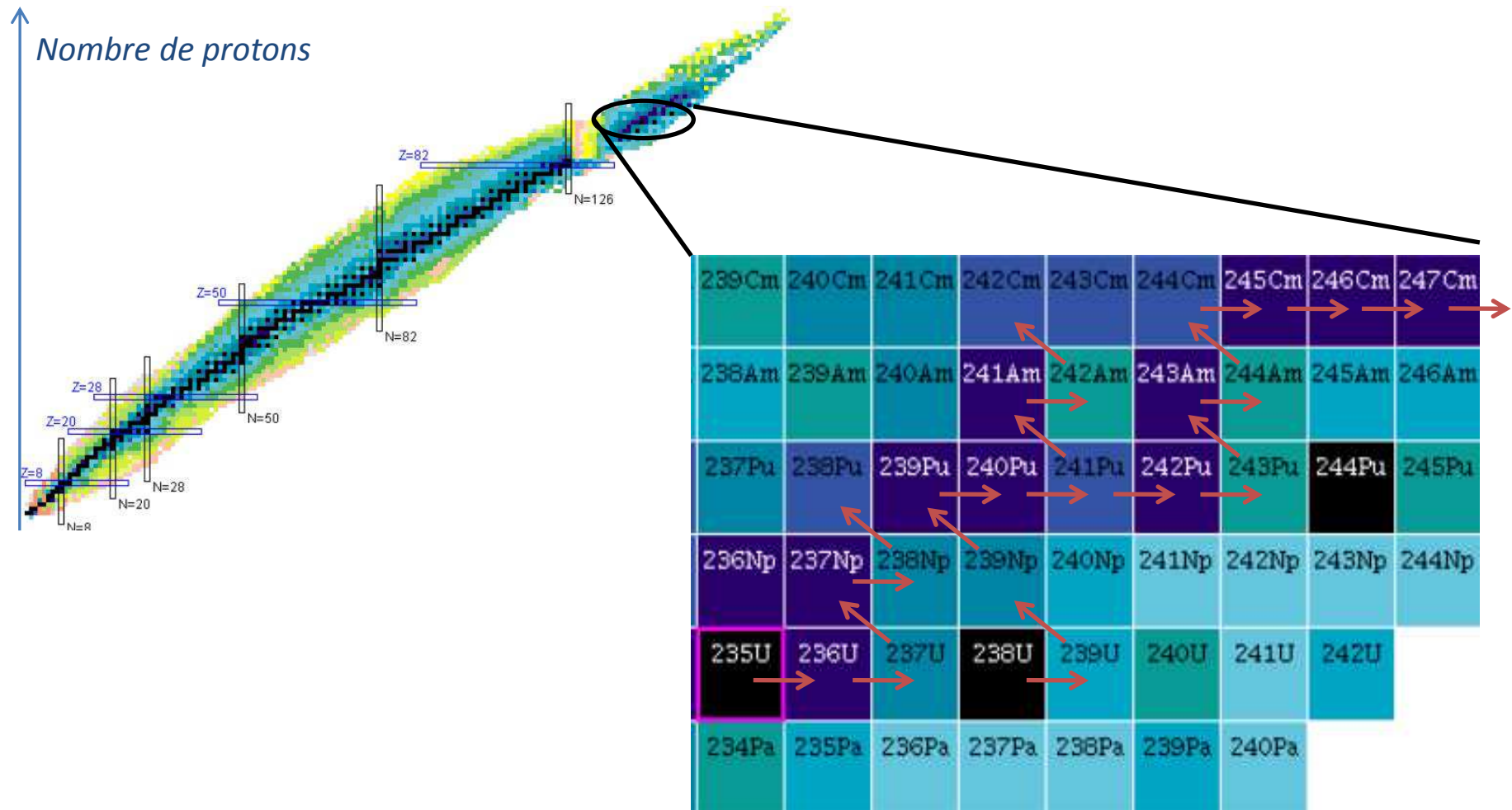
La fission



La fission fabrique des produits de fission très radioactifs
→ Il faut refroidir longtemps même quand il n'y a pas de fission

Une semaine après l'arrêt : il faut encore évacuer 9 000 kW

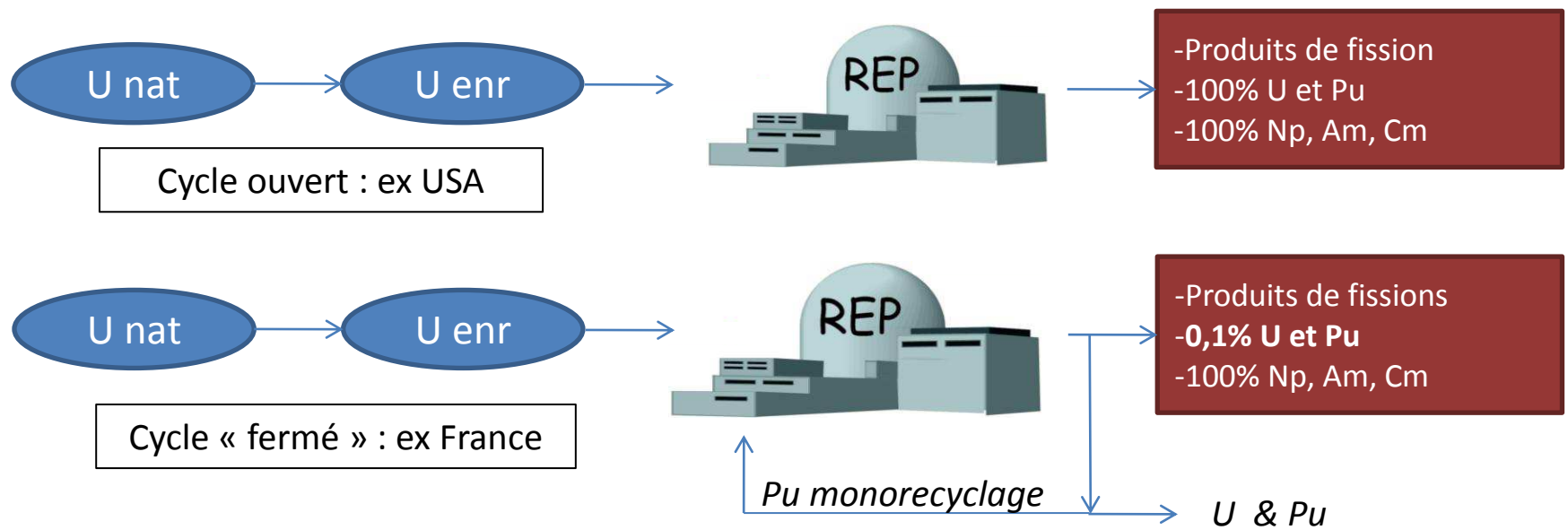
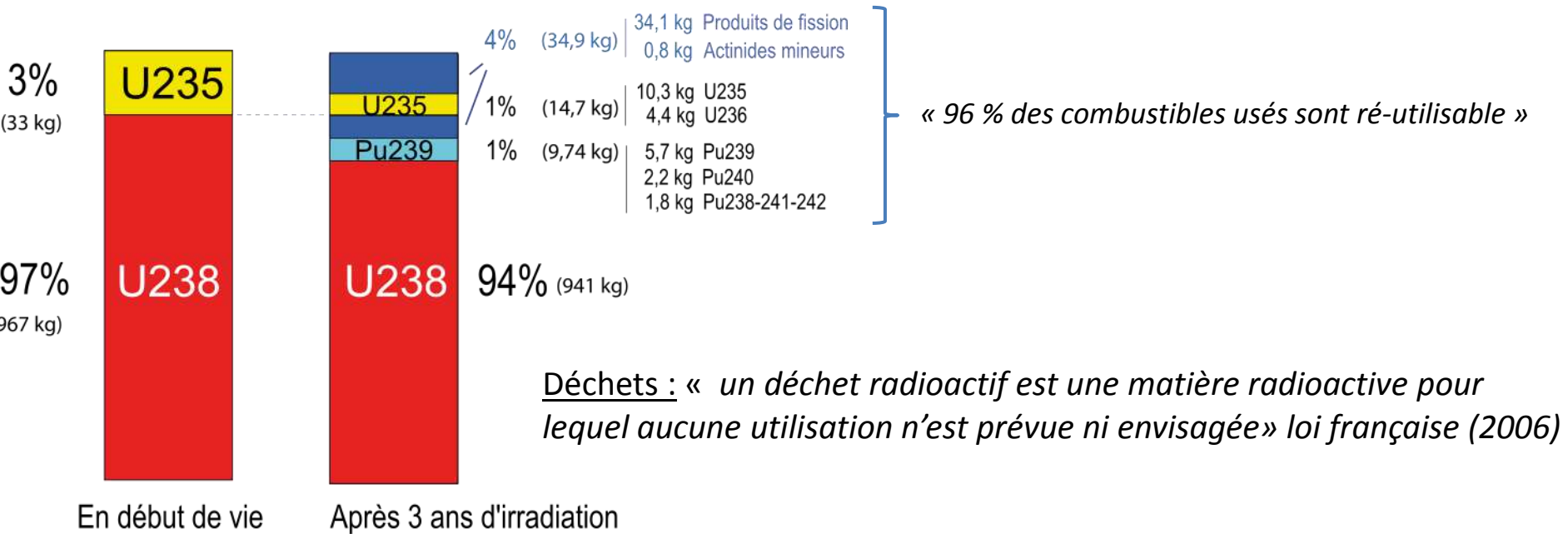
La fission



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 !

Déchet nucléaire



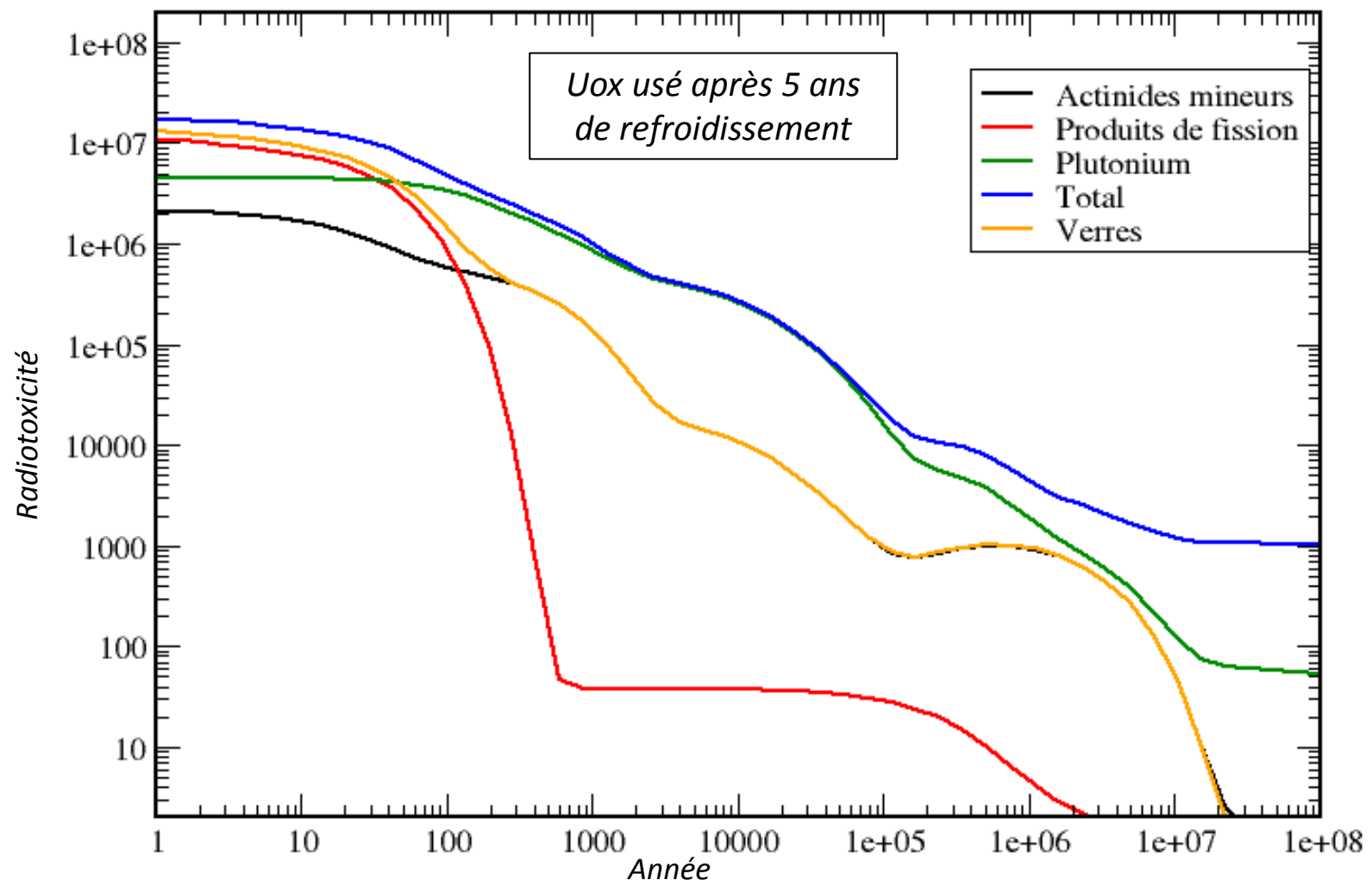
Comment qualifier les déchets nucléaires ?

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

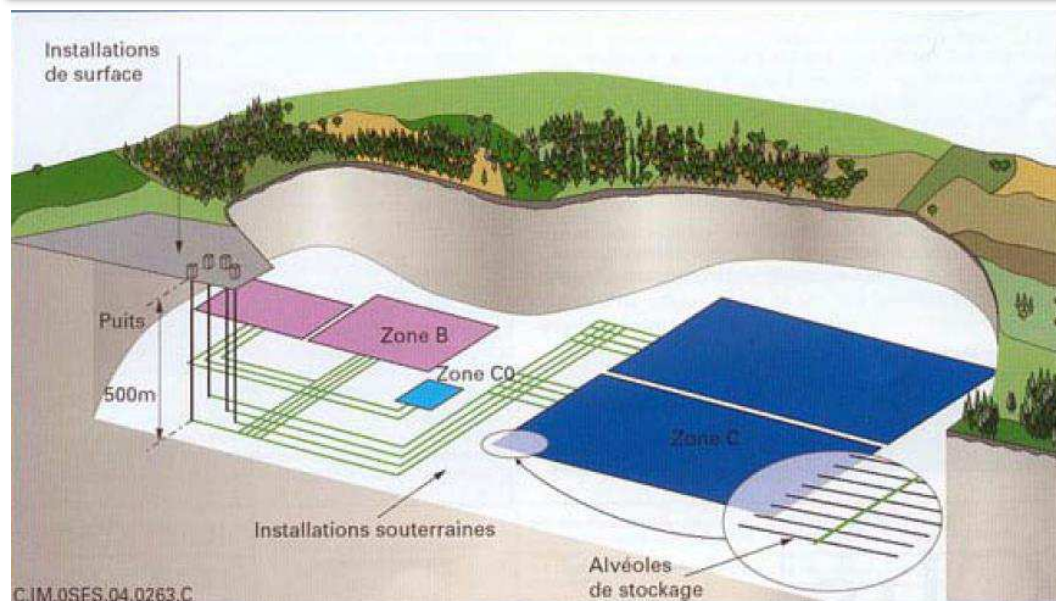
Le sievert est une unité construite pour quantifier les dommages des radiations sur le corps humain

→ Hypothèse de calcul : on considère une exposition par ingestion

→ la radiotoxicité ne présente rien de réel mais est un bon moyen pour comparer les déchets



Le stockage en couche géologique profonde

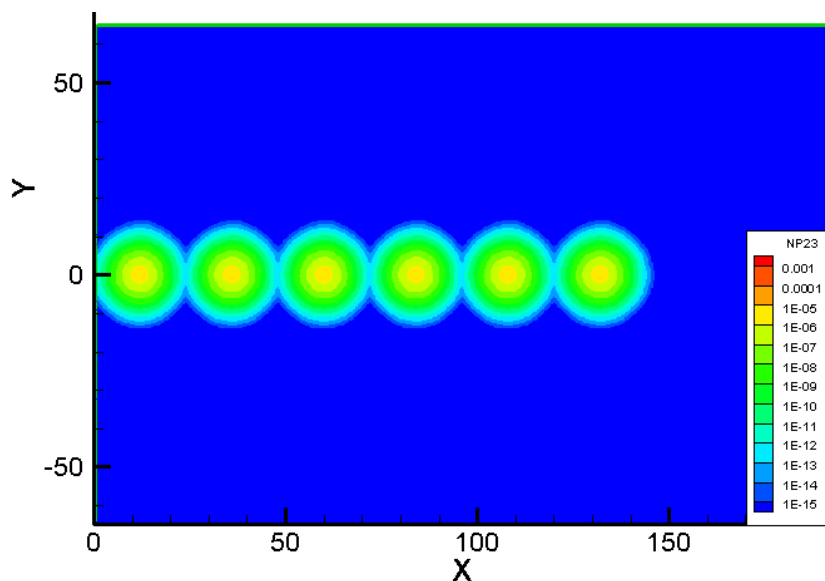


Deux types de déchets à vie longue

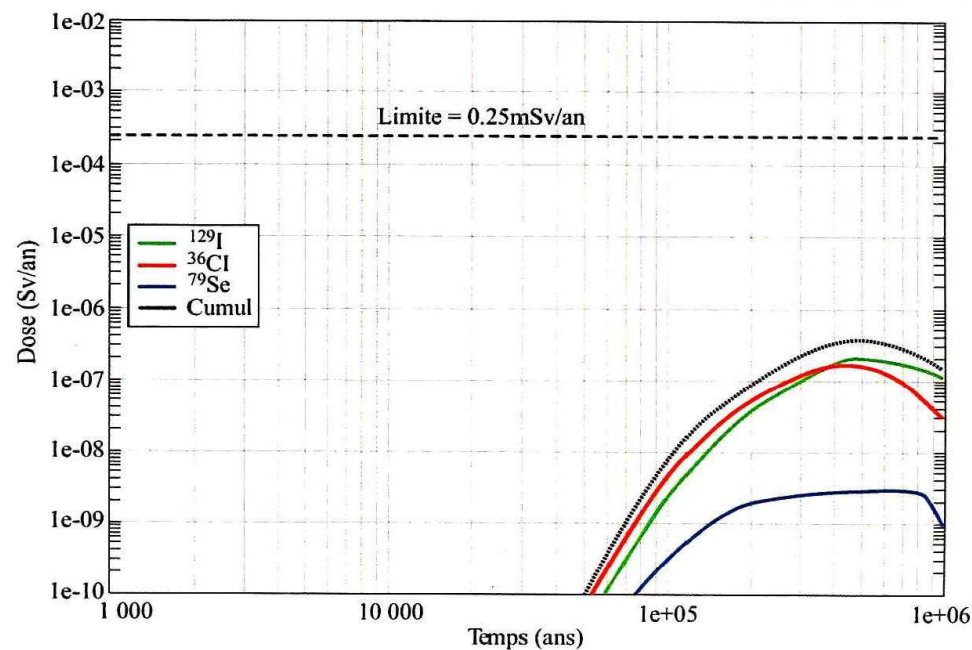
- Haute activité
- Moyenne activité



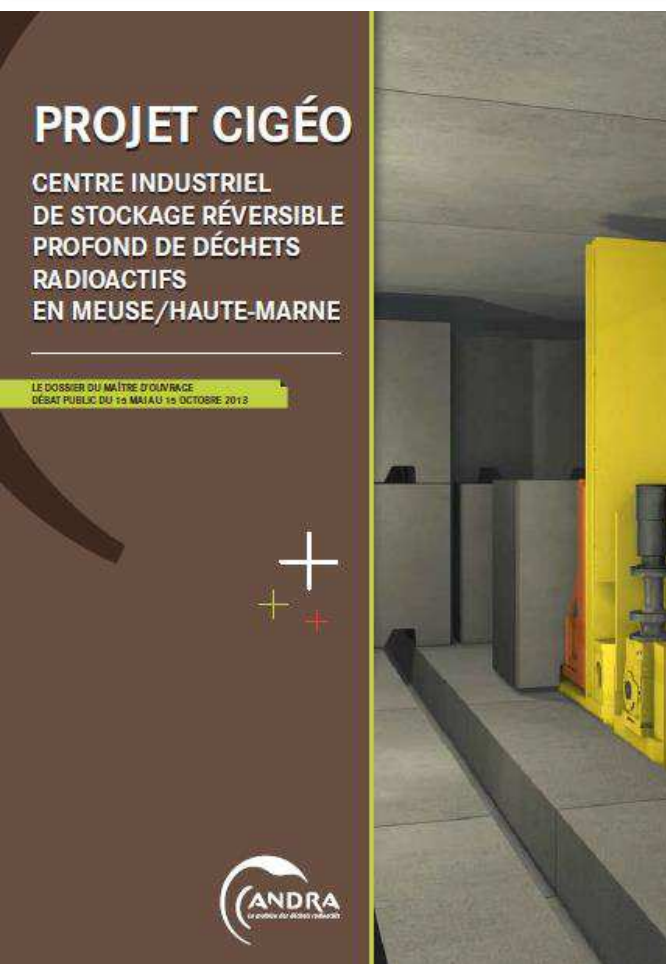
Est-ce sur ?



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



Dose maximale à la surface du au stockage



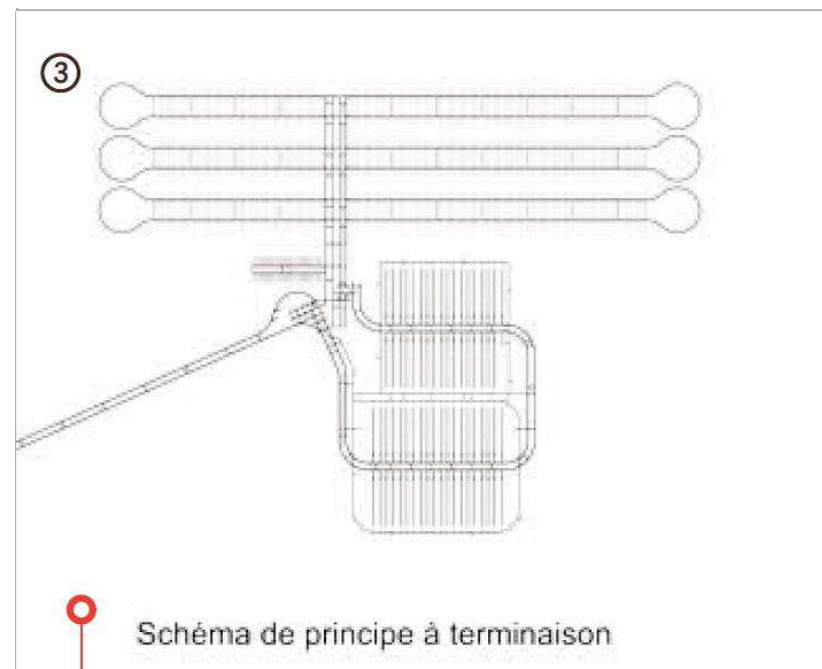
L'inventaire de CIGEO :

	Déjà engagé*	Après 40 ans avec retraitement	Après 40 ans sans retraitement	Capacité CIGEO
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

- **CIGEO ne concerne que** les déchets produits et « à produire » des **réacteurs actuels**
- 60 % des MA-VL et 30% des HA-VL de CIGEO sont déjà produits

La surface total représente environ 15 km² à terme

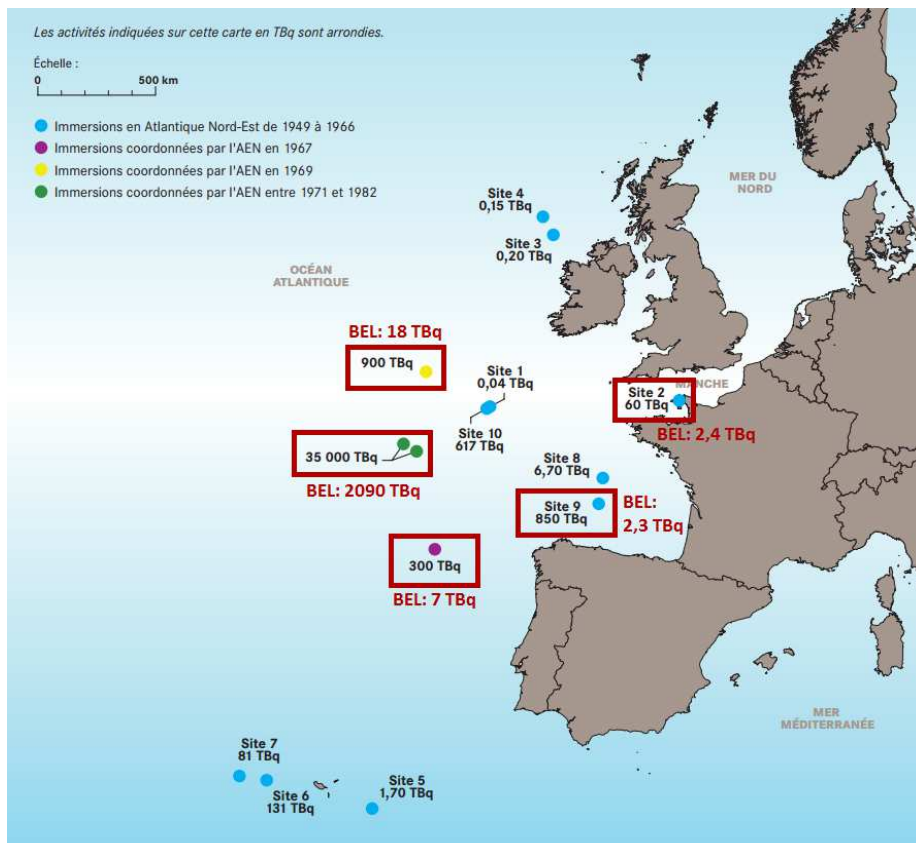


- 5% du total des déchets HA seront installés en 2025 dans CIGEO pour observation pendant 50 ans.
- Le stockage des HA ne débutera donc pas avant 2075 !

La question des déchets n'est pas une problématique récente

→ 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 α

Quel gain aux combustibles Mox ?

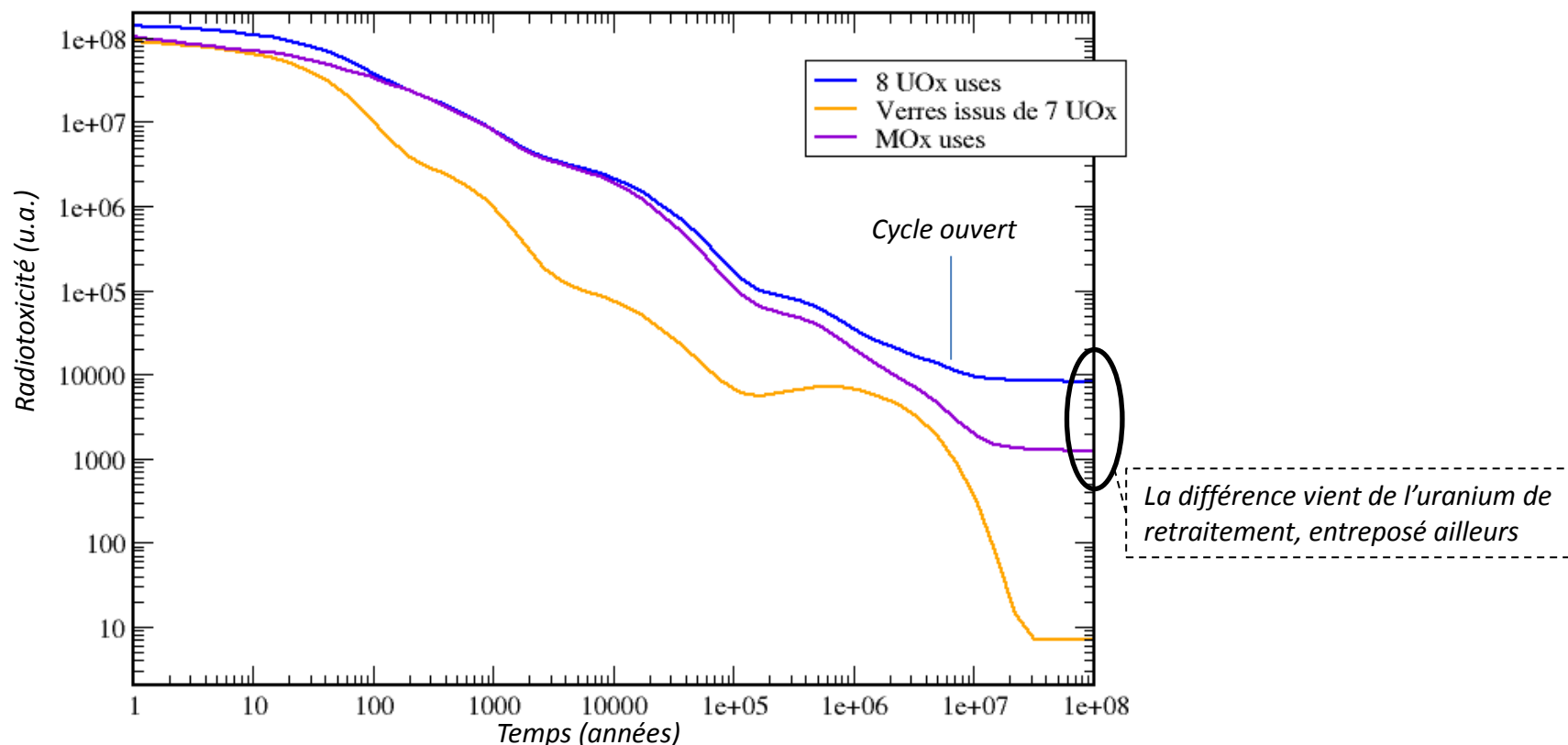
Le plutonium peut être utilisé comme matière fissile pour remplacer l'uranium 235.

→ *Utilisation des combustibles Mox pour économiser l'uranium*

→ *Incinération du plutonium pour faire décroître la radiotoxicité des matières irradiées*

7 Uox utilisés produisent le plutonium nécessaire pour un assemblage MOx

→ On remplace donc 1 assemblage sur 8 !

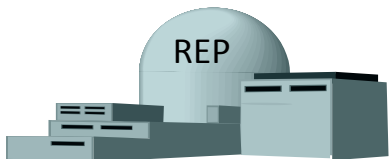


➤ On concentre la **radiotoxicité dans les Mox utilisés** en vue **de valoriser le plutonium** 'plus tard'

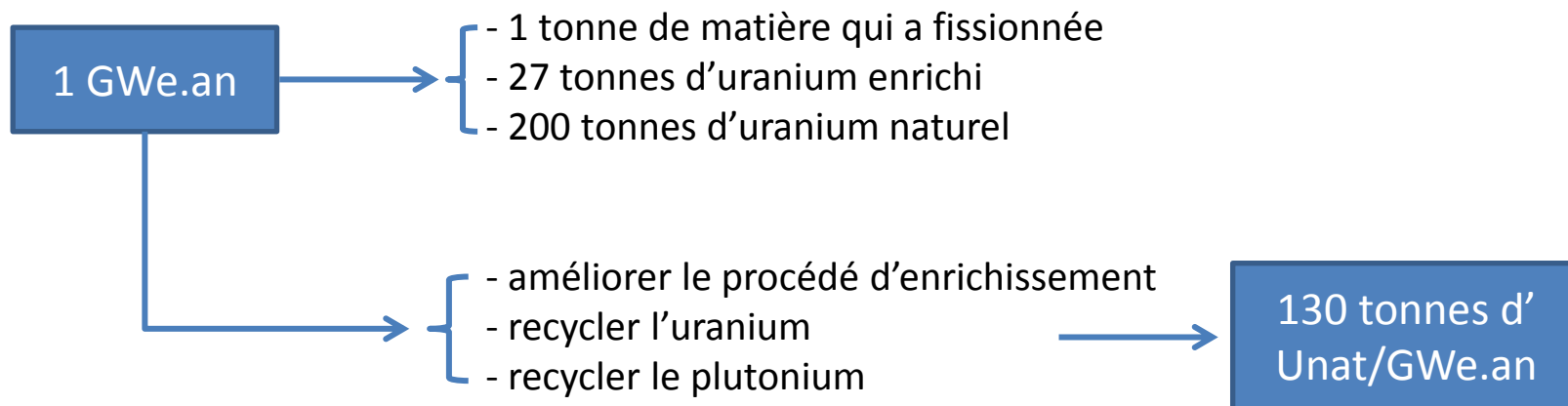
➤ Mais ils deviendraient des déchets si l'on a pas besoin d'économiser l'uranium avec les réacteurs régénérateurs

→ *L'économie d'uranium n'est nécessaire que s'il y a des tensions sur les ressources naturelles*

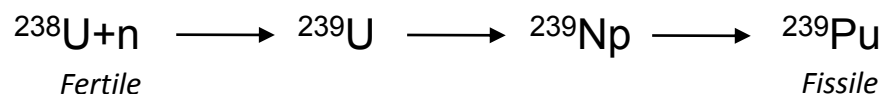
La valorisation du plutonium



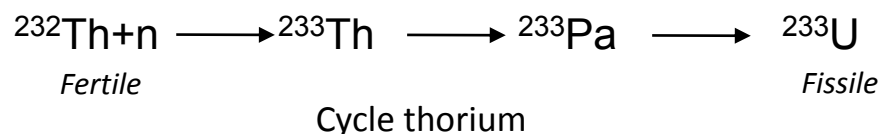
Basé sur l'utilisation de l' ^{235}U (0,7% de l'uranium naturel)



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



- La masse de plutonium dans le réacteur est constante
- 1 tonne d'uranium appauvri par GWe.an
- Il faut multirecycler les combustibles

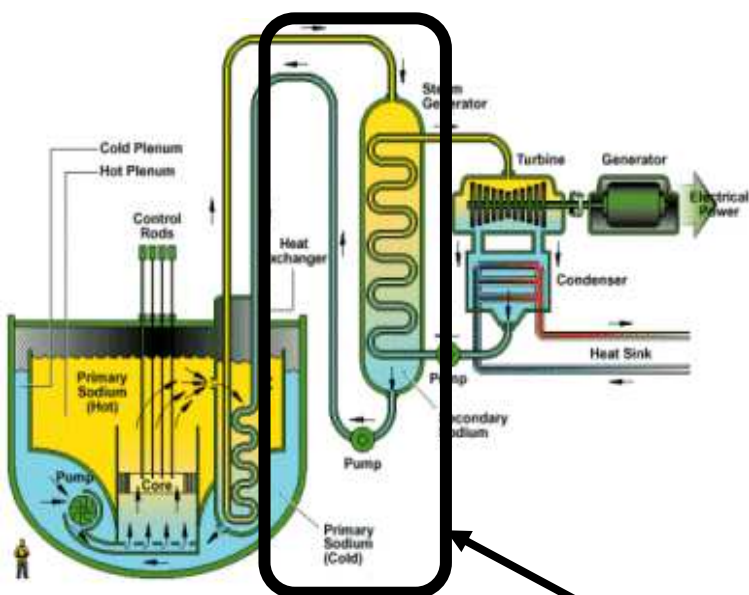


Les RNR ne valorisent pas l'U-238

Dans les deux cas, il « suffit » d'avoir la matière fissile au démarrage pour fonctionner « indéfiniment »

Réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium

L'exemple de superphénix



➤ Refroidissement : Sodium liquide

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

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

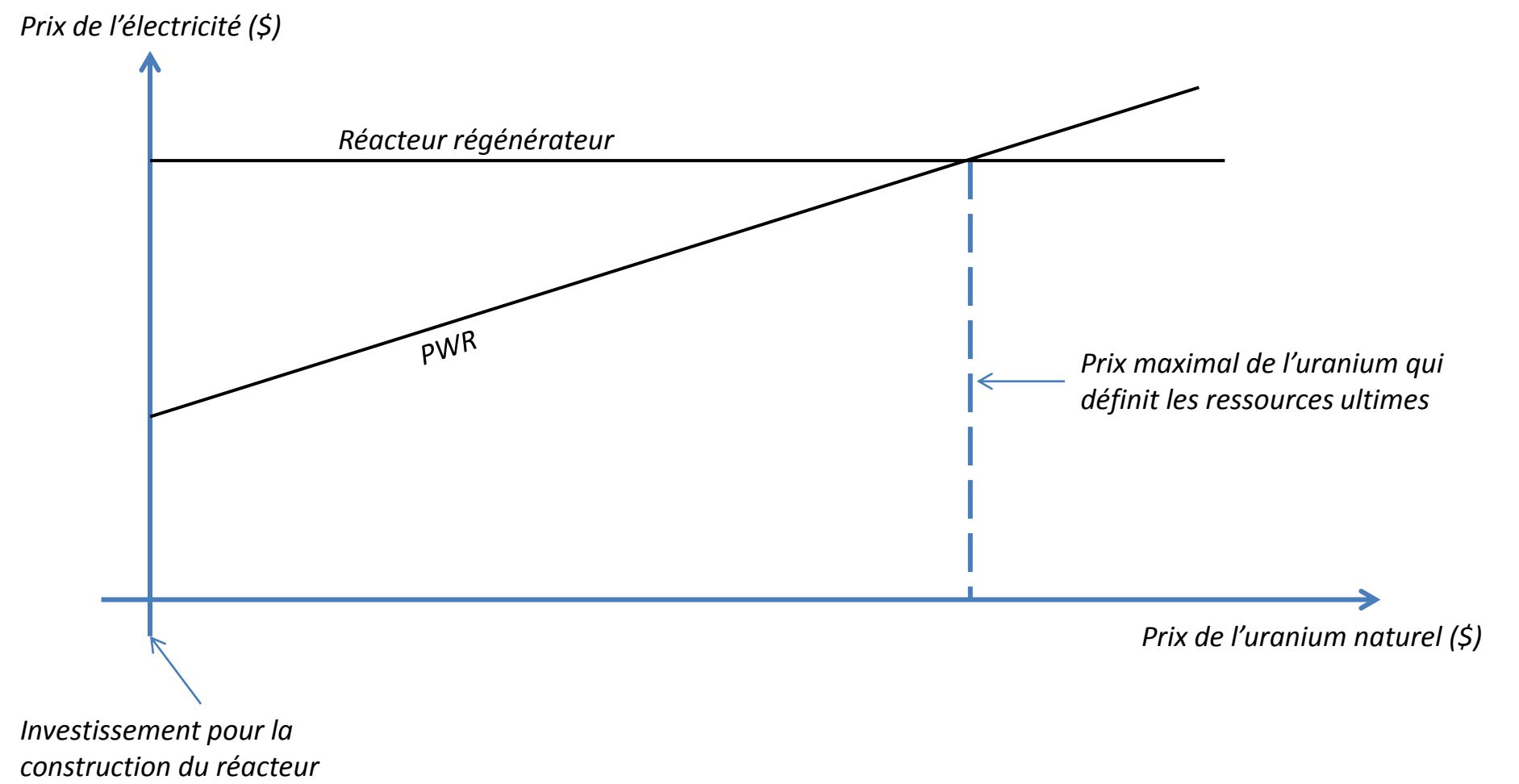
- Nécessite un échangeur supplémentaire pour les générateurs de vapeurs

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

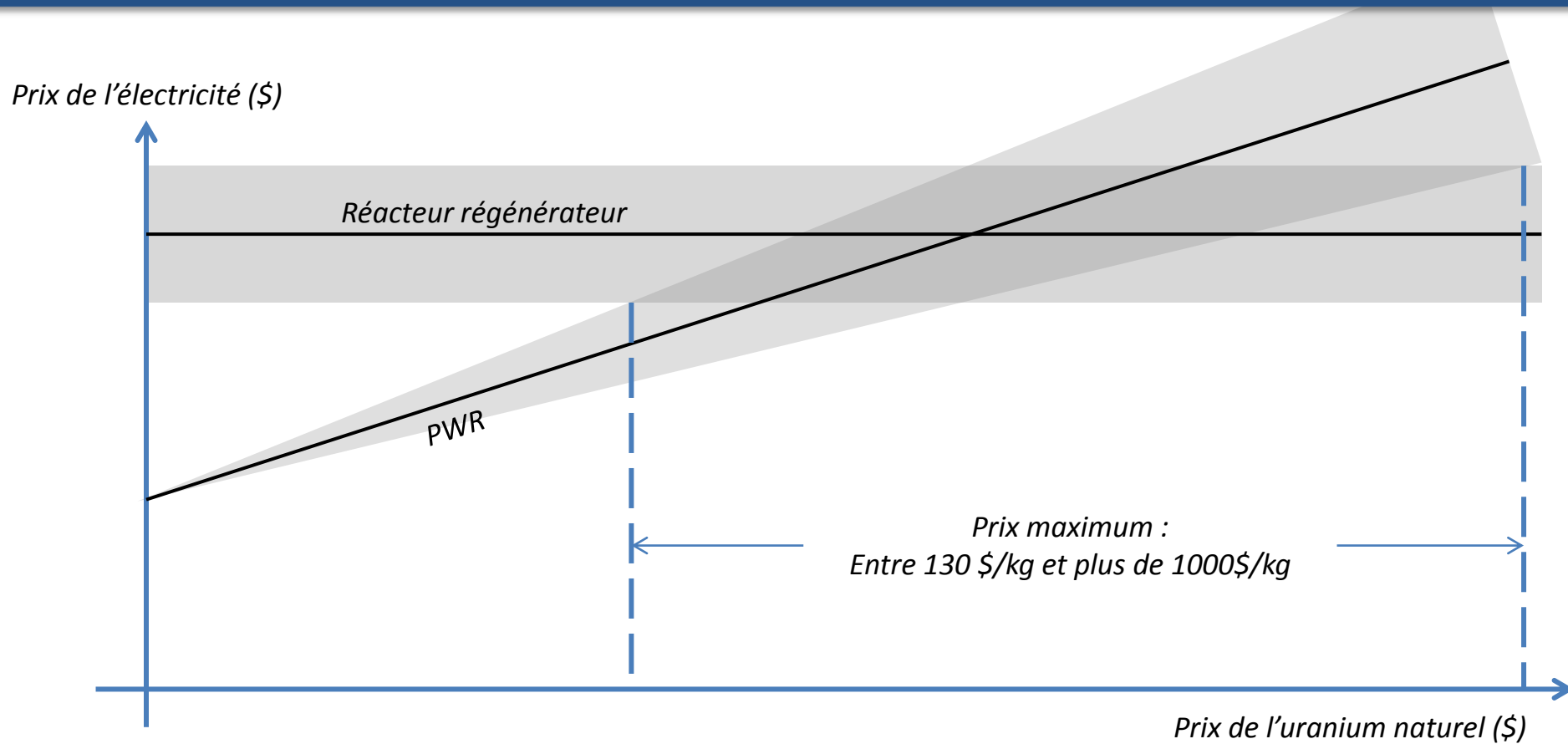
Augmentation des
coûts de constructions

La France a plus d'expérience dans le
démantèlement des réacteurs aux sodiums de
1200 MW_e que dans les REP actuel

Intérêt économique d'un changement de technologie

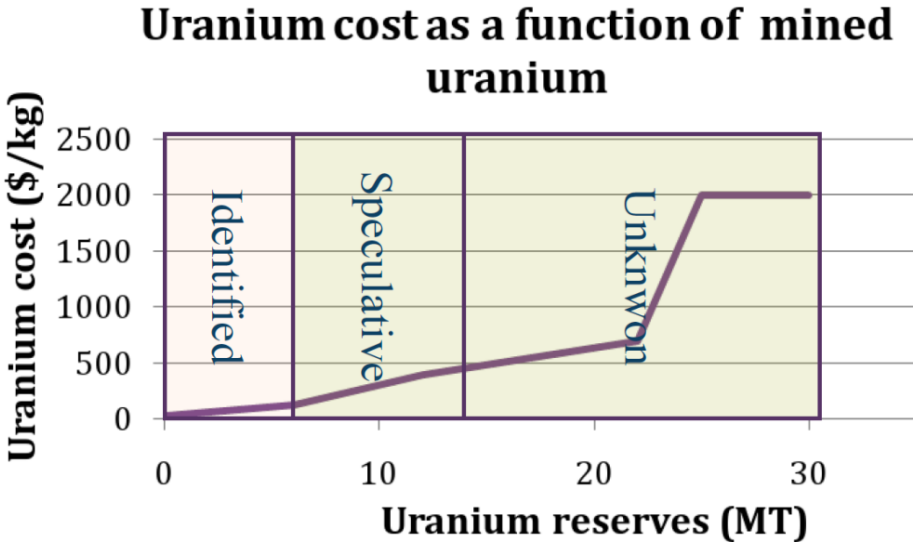


Et avec les barres d'erreurs



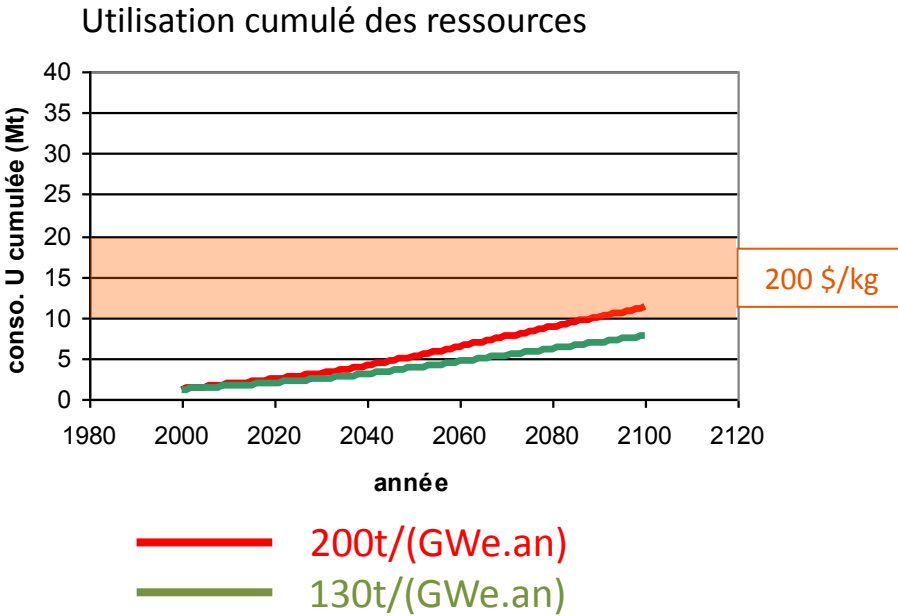
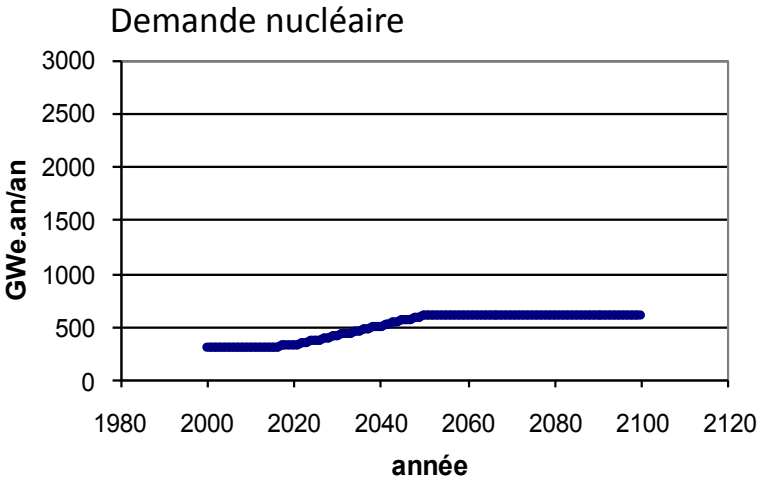
Aujourd'hui : 285 GWe (équivalent pleine puissance)
→ 60 000 tonnes d'uranium naturel consommé par an

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

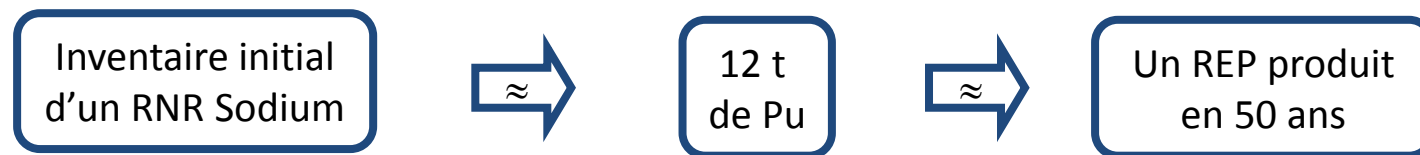


	< 130\$/kg	< 260 \$/kg
Identified	5,9 Mt	7,6 Mt
Speculative	6,5 Mt	6,9 Mt

- Aujourd'hui:
- 45 000 tonnes d'Unat /an
 - Cigar lake :
 - ouverture prévue en 2007
 - ouverture réelle en 2014
 - Production de 10 900 t/an



La nécessité de voir en amont



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

La situation en **2012** :

300 tonnes de Pu «disponible» soit 30% seulement de l'inventaire d'un parc RNR

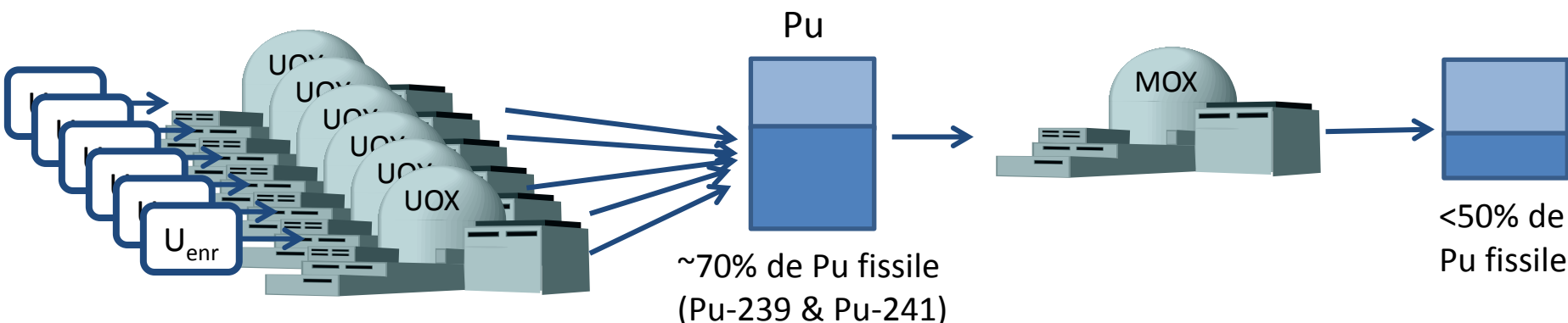
Si on a besoin rapidement des RNR (avant 2100), il faut économiser le plutonium

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

→ **En 2040, retraitement d'un assemblage au lieu de 8 !**

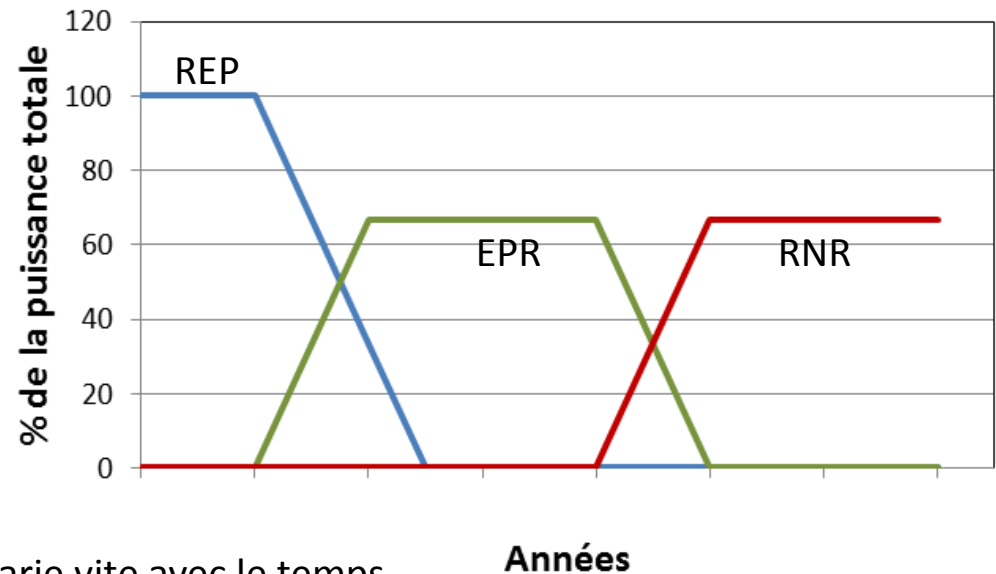
→ *Maintien des compétences industrielles*



L'importance de la temporalité

- Quelle voie de sortie à la fin du siècle
→ *Grosse incertitude sur le temps*

... a combiner avec une constante de temps de 14 ans !



- La qualité du plutonium produit dans les REP varie vite avec le temps
→ *Ice cream effect (eat it quickly or get dirty)*

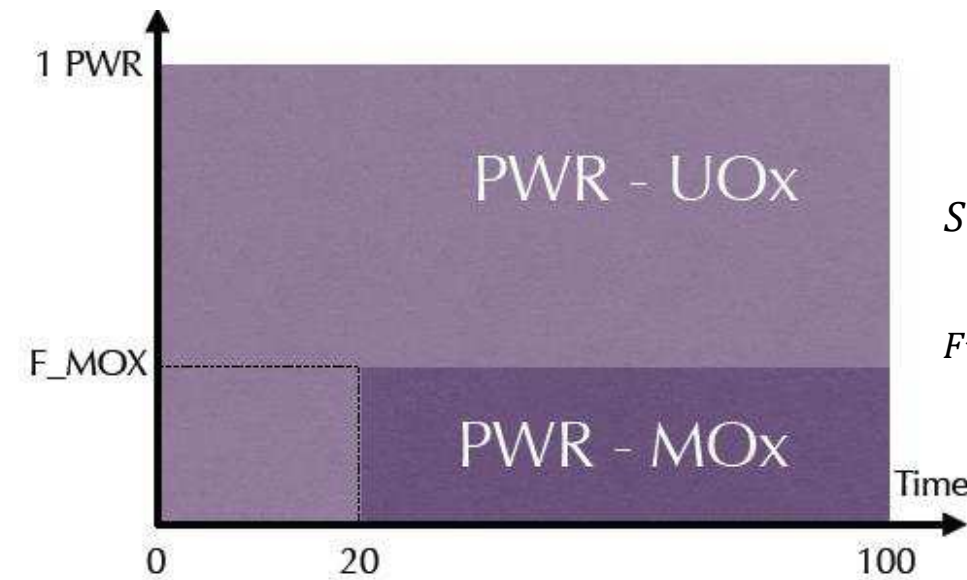
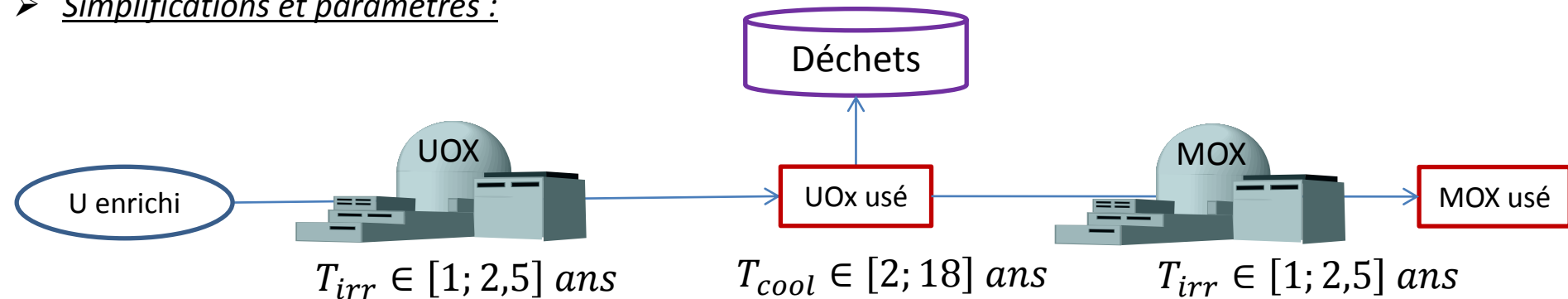
239Cm ≈2.9 H ε: 100.00% α: 0.10%	240Cm 27 D α: > 99.50% ε: < 0.50%	241Cm 32.8 D ε: 99.00% α: 1.00%	242Cm 162.8 D α: 100.00% SF: 6.2E-6%	243Cm 29.1 Y α: 99.71% ε: 0.29%	244Cm 18.1 Y α: 100.00% SF: 1.4E-4%	245Cm 8423 Y α: 100.00% SF: 6.1E-7%	246Cm 4706 Y α: 99.97% SF: 0.03%	247Cm 1.56E+7 Y α: 100.00%
238Am 98 M ε: 100.00% α: 1.0E-4%	239Am 11.9 H ε: 99.99% α: 0.01%	240Am 50.8 H ε: 100.00% α: 1.9E-4%	241Am 432.6 Y α: 100.00% SF: 4E-10%	242Am 16.02 H β: 82.70% ε: 17.30%	243Am 7370 Y α: 100.00% SF: 3.7E-9%	244Am 10.1 H β: 100.00%	245Am 2.05 H β: 100.00%	246Am 39 M β: 100.00%
237Pu 45.64 D ε: 100.00% α: 4.2E-3%	238Pu 87.7 Y α: 100.00% SF: 1.9E-7%	239Pu 24110 Y α: 100.00% SF: 3.E-10%	240Pu 6561 Y α: 100.00% SF: 5.7E-6%	241Pu 14.325 Y β: 100.00% α: 2.5E-3%	242Pu 3.75E+5 Y α: 100.00% SF: 5.5E-4%	243Pu 4.956 H β: 100.00%	244Pu 8.00E+7 Y α: 99.88% SF: 0.12%	245Pu 10.5 H β: 100.00%
236Np 153E+3 Y ε: 86.30% β: 13.50%	237Np 2.144E+6 Y α: 100.00% SF: 2E-10%	238Np 2.117 D β: 100.00%	239Np 2.356 D β: 100.00%	240Np 61.9 M β: 100.00%	241Pu			244Np 2.29 M β: 100.00%
				E(level)	Jn	T _{1/2}	Decay Modes	
				0.0	5/2+	14.325 y	6 β ⁻ : 100.00 % α: 2.5E-3 % SF < 2E-14 %	
235U 7.04E+8 Y 0.7204% α: 100.00% SF: 7.0E-9%	236U 2.342E7 Y α: 100.00% SF: 9.4E-8%	237U 6.75 D β: 100.00%	238U 4.468E9 Y 99.2742% α: 100.00% SF: 5.5E-5%	239U 23.45 M β: 100.00%	14.1 H β: 100.00%		16.8 M β: 100.00%	243U

Besoin de stratégies « flexibles » :

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

Un parc français académique

➤ Simplifications et paramètres :



Stratégie $\in \begin{bmatrix} \text{First In First Out} \\ \text{Last In First Out} \\ \text{Random} \end{bmatrix}$

Fraction MOx $\in [0\%; 20\%]$



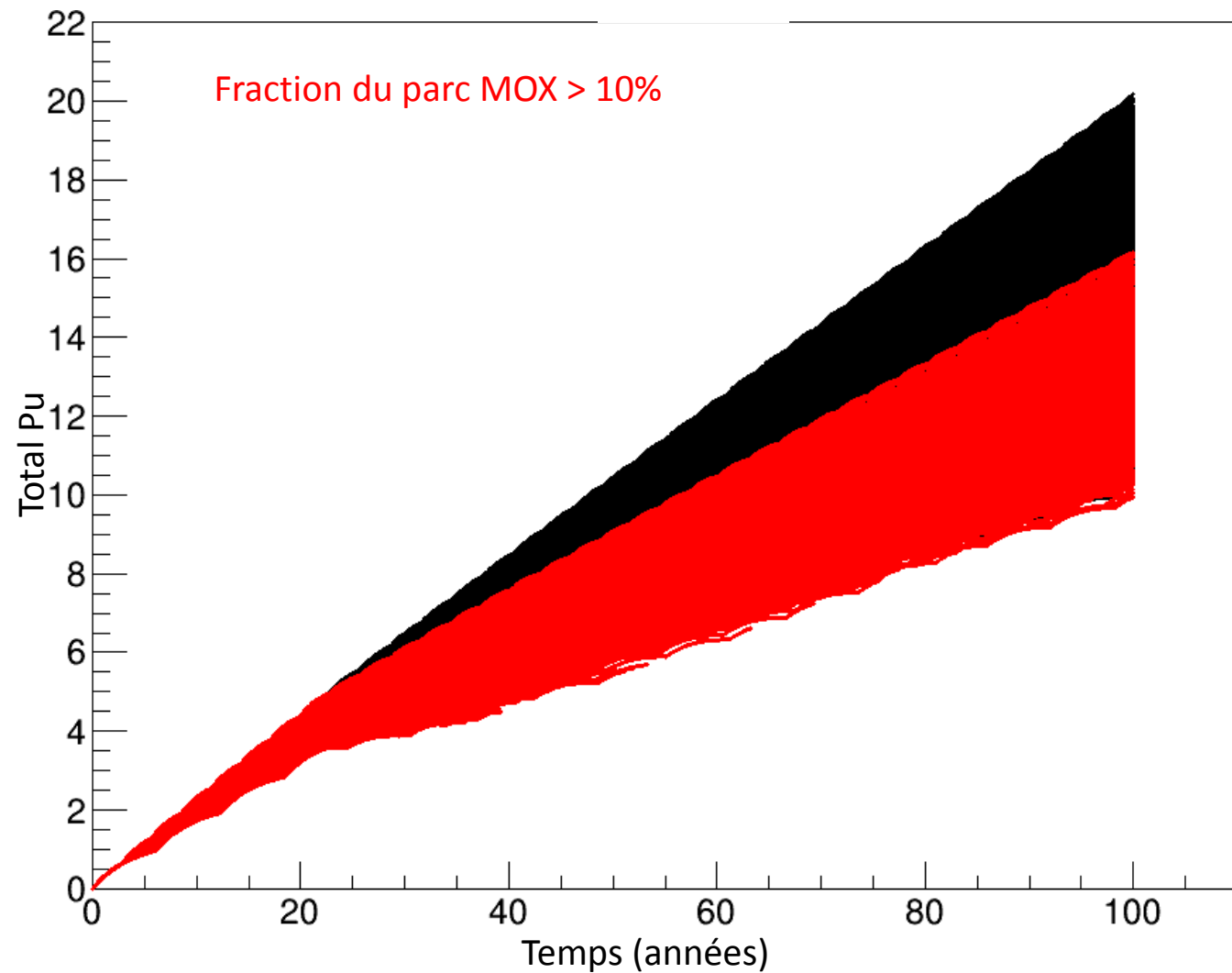
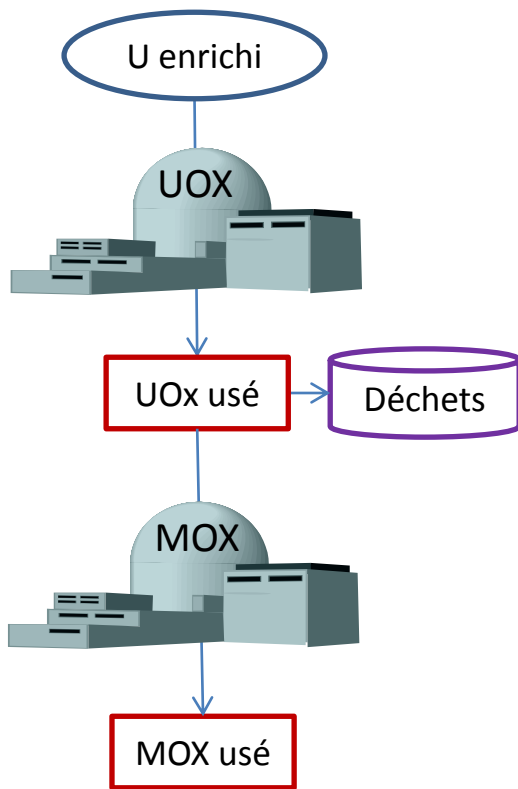
Core Library for Advanced
Scenario Simulations
→ Modélisation du cycle

➤ Echantillonnage et réalisation de N calculs (N ~ 10 000)

➤ Observables

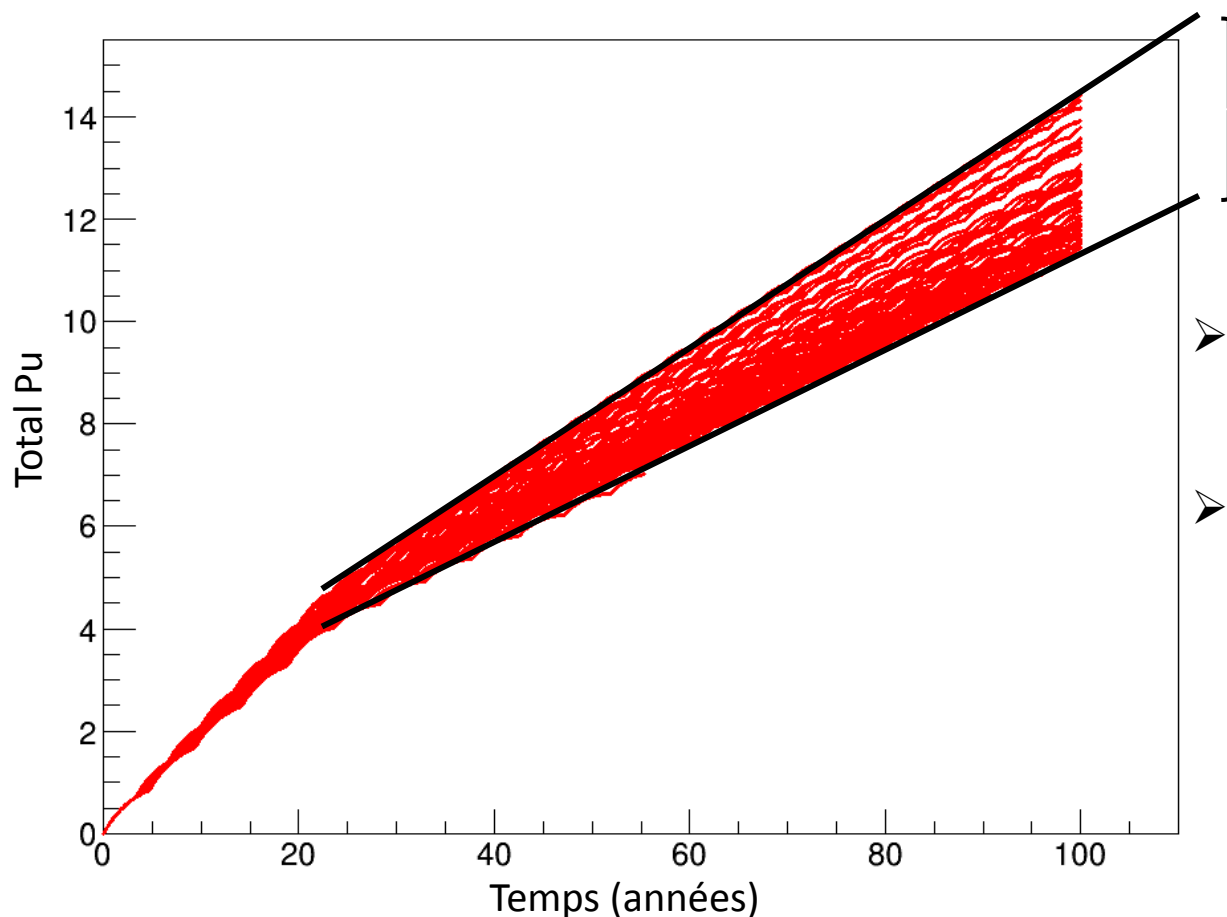
- Inventaire plutonium total en cycle
- Consommation d'uranium naturel

- Ensemble des évolution du plutonium en fonction du temps



➤ Les contraintes sur le parc Français :

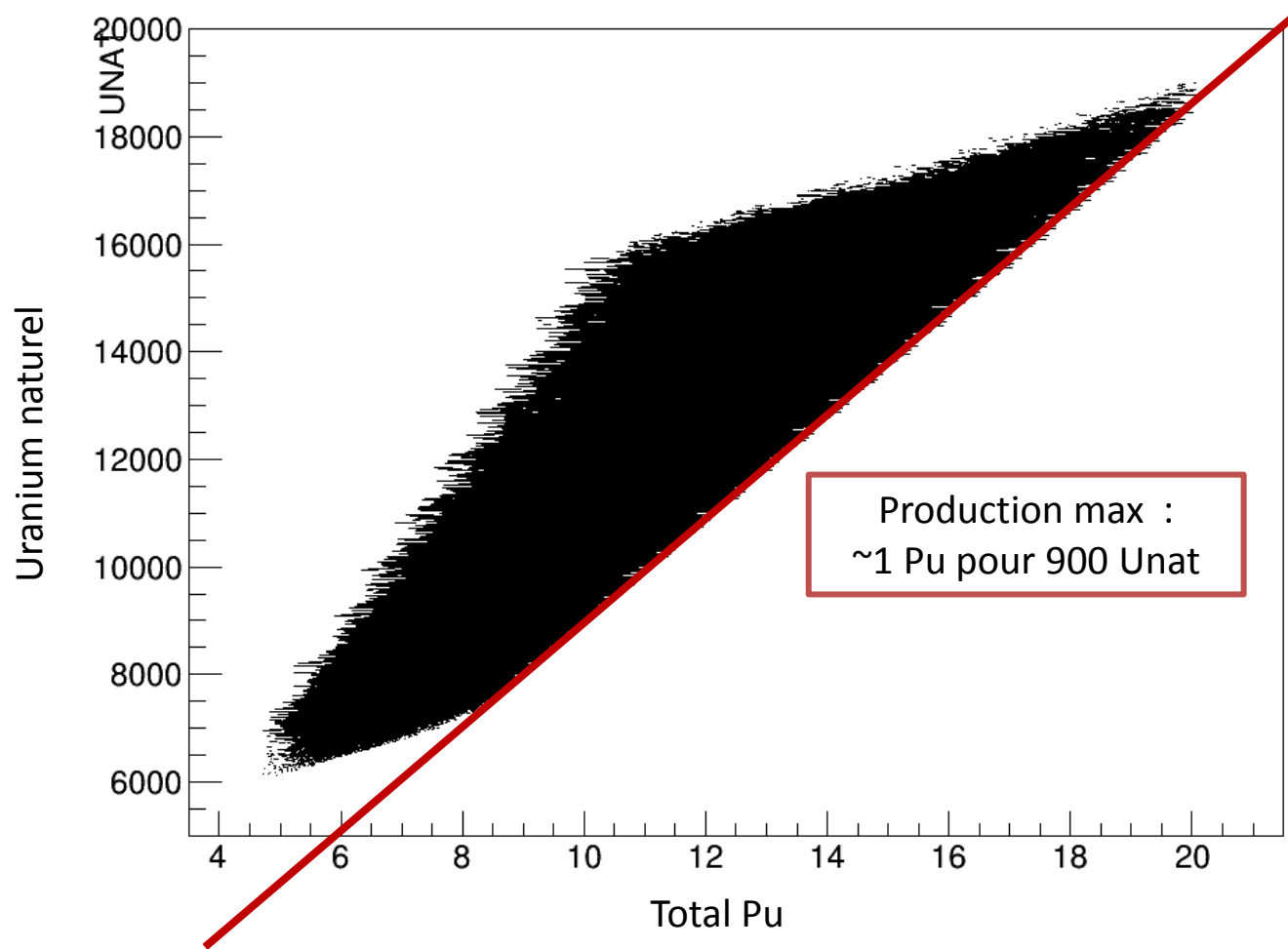
- Une fraction de Mox comprise entre 10 et 12% (fixée)
- Des temps de fonctionnement compris entre 1 an et 1 an ½
- La parité MOX (temps irradiation UOX = temps irradiation MOX)



Variation de pente :
28 %

- Pour un parc 100% RNR il faut 1500 tonnes de plutonium
- Au rythme actuel de ~10 t/ans, un parc 100% RNR (à puissance constante) sera possible en 2150

- La consommation d'uranium naturel est directement liée à la fraction de MOX dans le parc



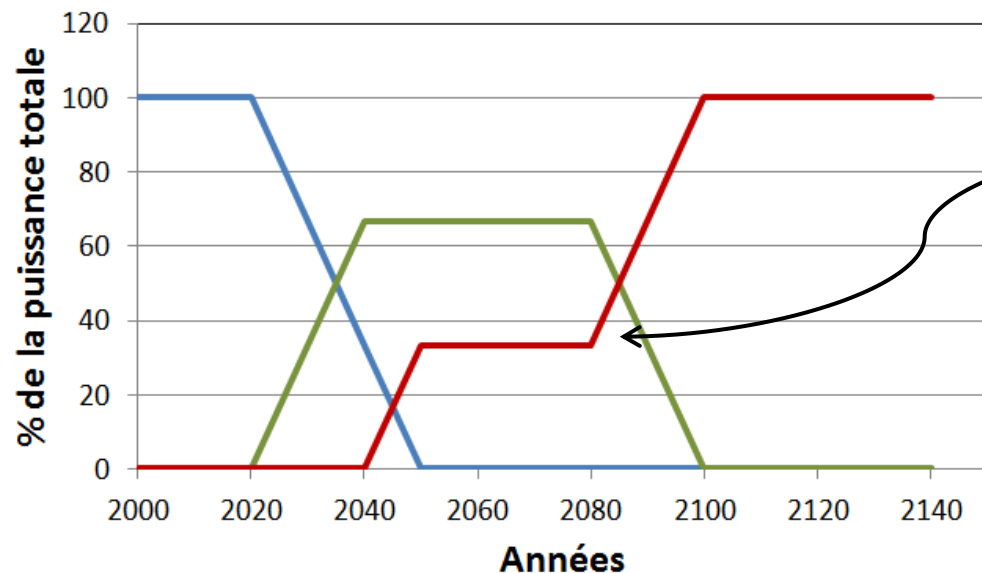
- Rappels :

- 1 RNR = 15 à 20 tonnes de Pu
- $\sim 10^7$ tonnes d'uranium naturel disponible

→ Entre 500 et 700 RNR possibles

La crise de l'uranium s'accompagnera d'une crise du plutonium → Nécessité de « sur-générer » le Pu

Retour sur le scénario de référence



1/3 du parc en 2050 = ~
500 tonnes de Pu

« Tendru mais ça passe »

- 100% du parc en 2100 → Il faut produire 1000 tonnes de Pu en 50 ans !
→ *Le scénario de référence parait difficilement tenable*
- Si par contre, l'horizon 100% RNR s'éloigne :
→ *Possibilité de ralentir la montée du plutonium*
→ *Stratégies de multi-recyclage ?*
- Un développement du nucléaire imposerait une crise de l'uranium qui justifierait le déploiement des RNR
→ *Si crise il y a, il n'y aura plus assez d'uranium pour produire le Pu et déployer les RNR*

**Comment garder une possibilité de choix
après 2050 ?**



L'accident de Fukushima a impacté le renouveau du nucléaire de 2010

Cependant la géopolitique montre que l'énergie nucléaire est toujours d'intérêt (Pologne, Angleterre, Asie,...)

→ Déploiement retardé

→ Nucléarisation déplacée géographiquement

Verra-t-on une augmentation forte de la demande nucléaire après 2025 ?

OUI

Facteur 4 ou plus

- La technologie actuelle consomme trop d'uranium naturel
- Il faudra entamer une transition GENIII-GENIV (qui nécessite une grande quantité de Pu)
- Plutonium est une matière valorisable

NON

< facteur 2

- L'économie d'uranium n'est pas prioritaire
- Les réacteurs GENIII sont satisfaisants
- Plutonium est le déchet principal

**Comment garder la flexibilité ?
Comment limiter l'engagement**