Energie(s) nucléaire(s) pour le futur: *Quel apport de la physique nucléaire ?*

Promotion Chien-Shiung Wu

Rencontre des deux infinis
16 - 27 juillet 2018

Xavier Doligez
Institut de physique nucléaire d'Orsay
doligez@ipno.in2p3.fr

Un lien historique évident !

1932 → Découverte du neutron
1938 → Phénomène de la fission induite

1939 → Preuve théorique d'un réaction en chaine

3 brevets publiés par Joliot et al.

- ✓ Brevet N° 976.541 du 1er mai 1939
  - *Possibilité de réaction en chaîne nucléaire*
- ✓ Brevet N° 976.542 du 2 mai 1939
  - *Possibilité de contrôler la réaction en chaîne*
- ✓ Brevet N° 971.324 du 4 mai 1939
  - *Possibilité d'en réaliser une charge explosive*

Université Paris-Saclay :
Un lieu adapté pour parler d'énergie

1939 – 1946 → Projet Manhattan

1941 →Premier réacteur nucléaire (200 W)

1946 → Création du CEA (et ouverture du Centre de Saclay)
1948 → Le CEA construit la première pile française ZOE (fort de Chatillon)

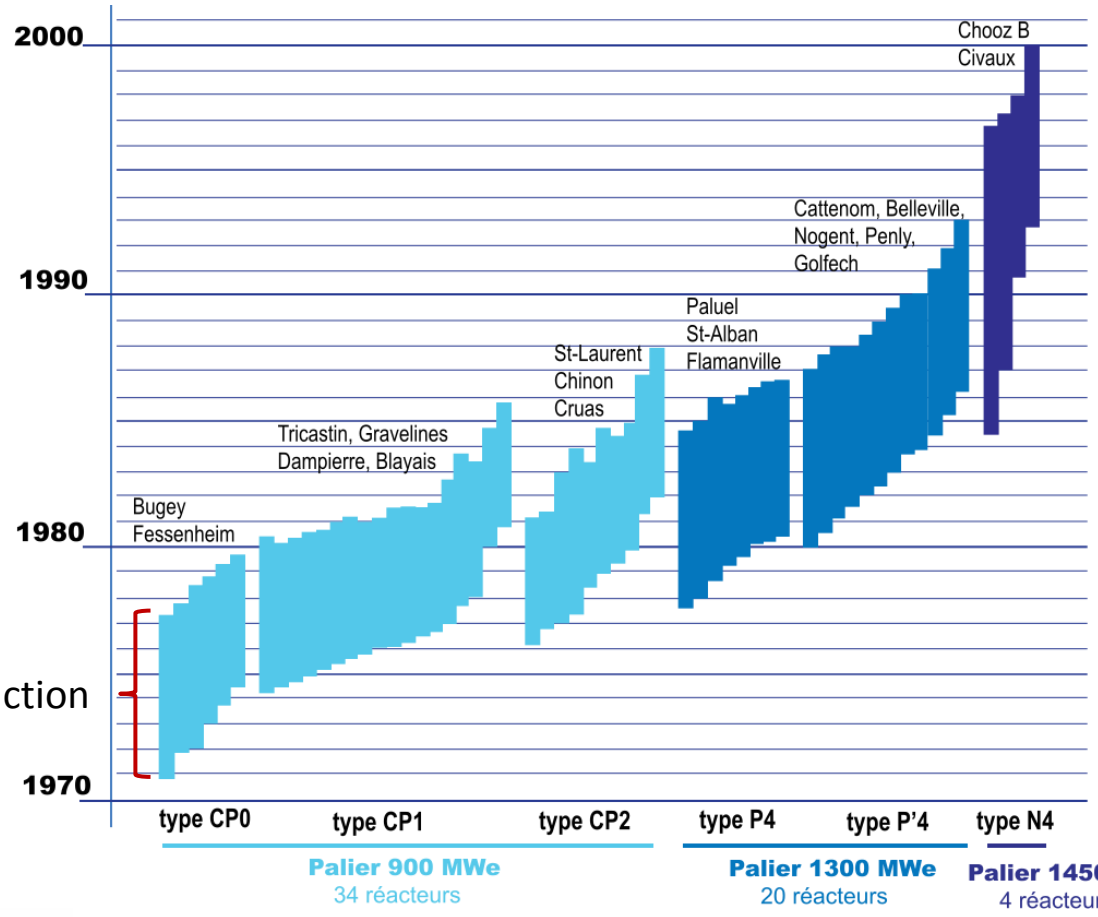
1973 → 1er choc pétrolier
1974 – 1980 → Engagement de l'équivalent de 55 réacteurs

Un peu d'histoire

- Jusqu'à 6 nouveaux réacteurs par an
- Un réacteur construits en 5 ans

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

Un réacteur pour 1,1 millions d'habitants



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Legifrance.gouv.fr
LE SERVICE PUBLIC DE LA DIFFUSION DU DROIT

1991 → loi Bataille relatif à la gestion des déchets radioactifs
2006 → Programme relatif à la gestion durable des matières

La France est elle le bon cadre géographique pour la discussion ?

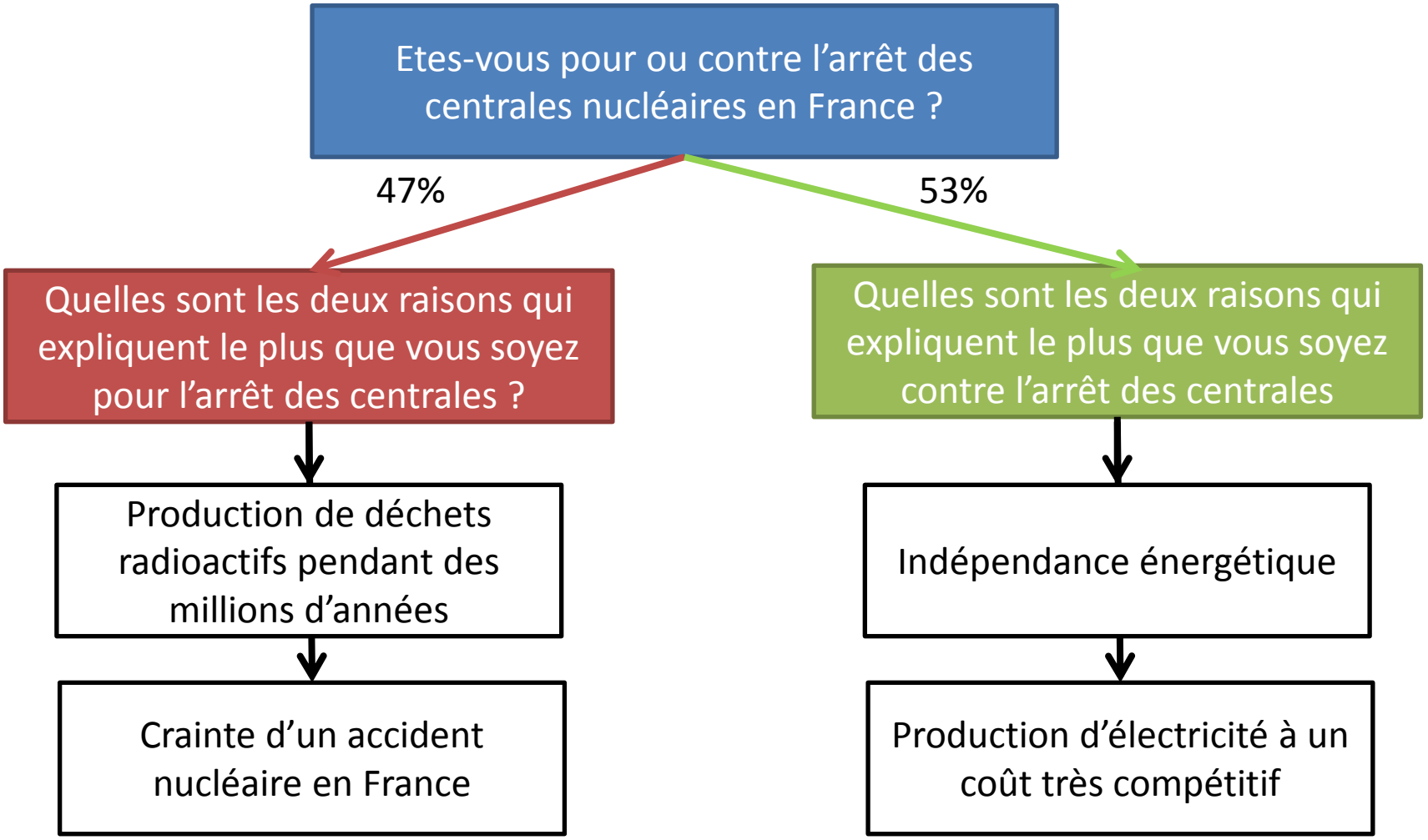
Energie nucléaire du futur ?

- Qu'en pense le principal intéressé ?
- Résultat d'un sondage fait en 2016 :

ifop

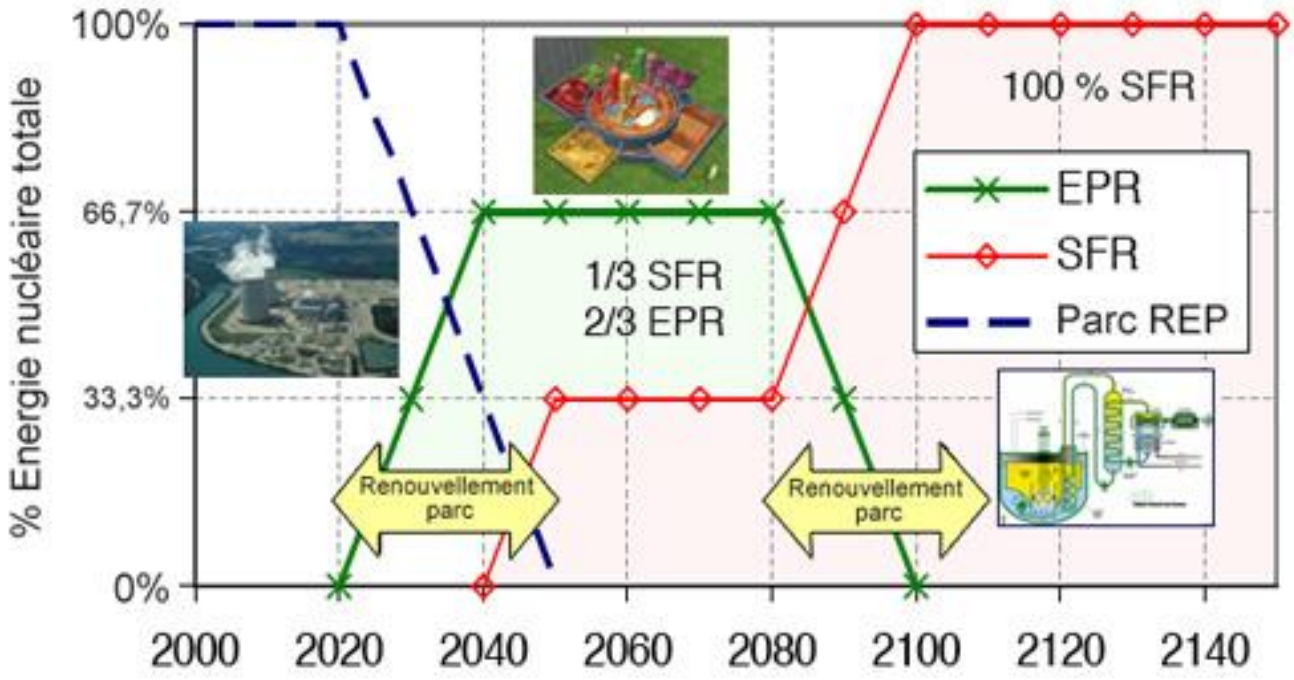
Les Français et l'énergie nucléaire

Ifop pour la Conférence #tcherno23



Et pour le futur ?

- Scénario Français de référence pour le nucléaire :



→ Maintien de la puissance nucléaire

→ Transition progressive (en deux étapes) des **R**éacteur à **E**au sous **P**ression vers les **R**éacteurs à **N**eutrons **R**apides

Pour un développement du nucléaire

… Mais …

Introduction : énergie nucléaire du future ?

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

Actualités Politiques publiques Ministère

Le contenu de la loi
Le parcours législatif
Les textes d'application
Les actions d'accompagnement

Accueil → Politiques publiques / de A à Z → Transition énergétique & bas carbone → Loi de transition énergétique pour la croissance verte

Loi de transition énergétique pour la croissance verte

Partager Tweeter Imprimer

Publié le Mardi 13 décembre 2016

La loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) publiée au Journal Officiel du 18 août 2015, ainsi que les plans d'action qui l'accompagnent visent à permettre à la France de contribuer plus efficacement à la lutte contre le dérèglement climatique et à la préservation de l'environnement, ainsi que de renforcer son indépendance énergétique tout en offrant à ses entreprises et ses citoyens l'accès à l'énergie à un coût compétitif.

Voté le 17 aout 2015

→ Réduction de la part du nucléaire à 50% de la production électrique à l'horizon 2025

→ *Fermeture de Fessenheim*

Plutôt un statuquo !

… Mais … → Maintien du parc actuel !

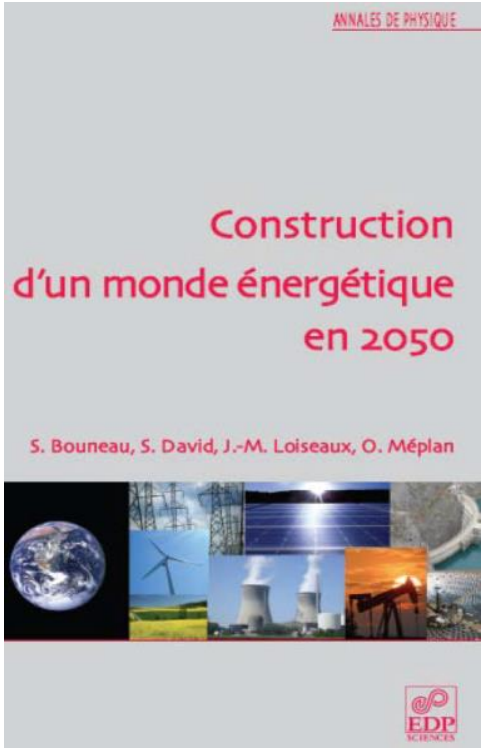
Pourquoi il y aura un (ou des) futur(s) pour l'énergie nucléaire ?

Piliers de la dé-carbonisation de l'énergie par l'AIE :
- Efficacité/sobriété
- Report sur l'électricité
- Décarbonisation des vecteurs

➢Scénario WWF :
→ 0 TWh nucléaire produit en 2050

➢Scénario pétrolier (Exon & Total) :
→ stable en 2050

Electricité nucléaire = 0 gCO2/TWh en fonctionnement



Hypothèses : 3 contraintes
- Climat *(limitation 2°C)*
- Production d'énergie *(20 Gtep)*
- Une répartition des consommations *(Clefs d'inégalité 4/2/1)*

Variable d'ajustement :
- Part du nucléaire en 2050

Facteur 9 est-ce si impossible ?		
Pays développés	Chine	France **(Aujourd'hui)**
4400 kWh/an/hab	**2400** kWh/an/hab	**7100** kWh/an/hab

Les problématiques sont très différentes si le nucléaire se développe ou non !

Plan du cours

1/Physique nucléaire et physique des réacteurs

La fission, la réaction en chaine et la criticité
L'importance des données nucléaires
La modélisation des réacteurs

2/ Les déchets nucléaires

Qu'est ce qu'un déchet nucléaire ?
Spécificité des déchets nucléaires : la radioactivité
Le débat CIGEO
L'intérêt de la stratégie française

3/ Les ressources en uranium naturel

La valorisation du plutonium
Les réacteurs de la quatrième génération sont-ils indispensables ?

4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

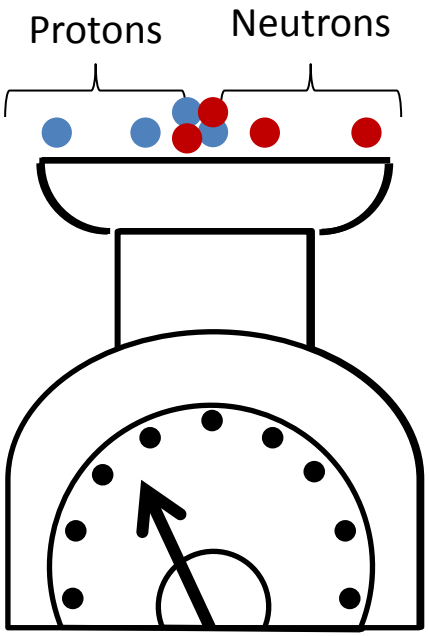
Qu'est ce que c'est ?
Un choix pour le futur et donc un non-choix ?

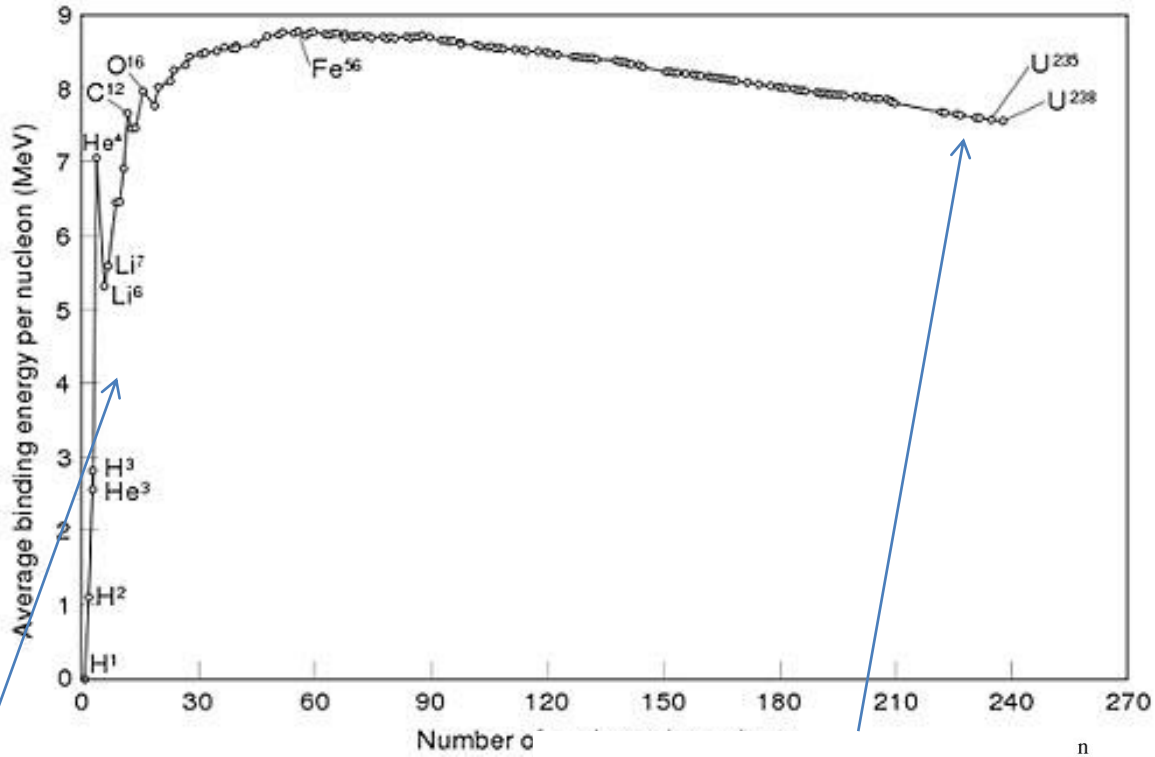
Conclusions

Des ordres de grandeurs qui compliquent le débat
Les projets de réacteurs européens
La place du CNRS/IN2P3 dans le débat

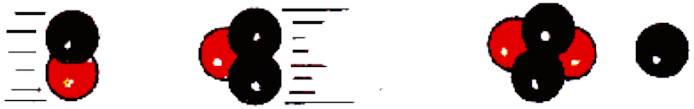
L'énergie des noyaux

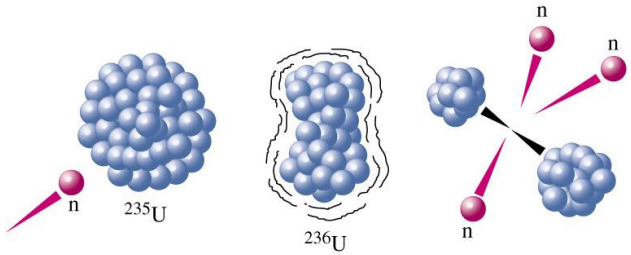
➢D'où vient l'énergie dégagée par la fission ? Quels noyaux peuvent fissioner ?





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

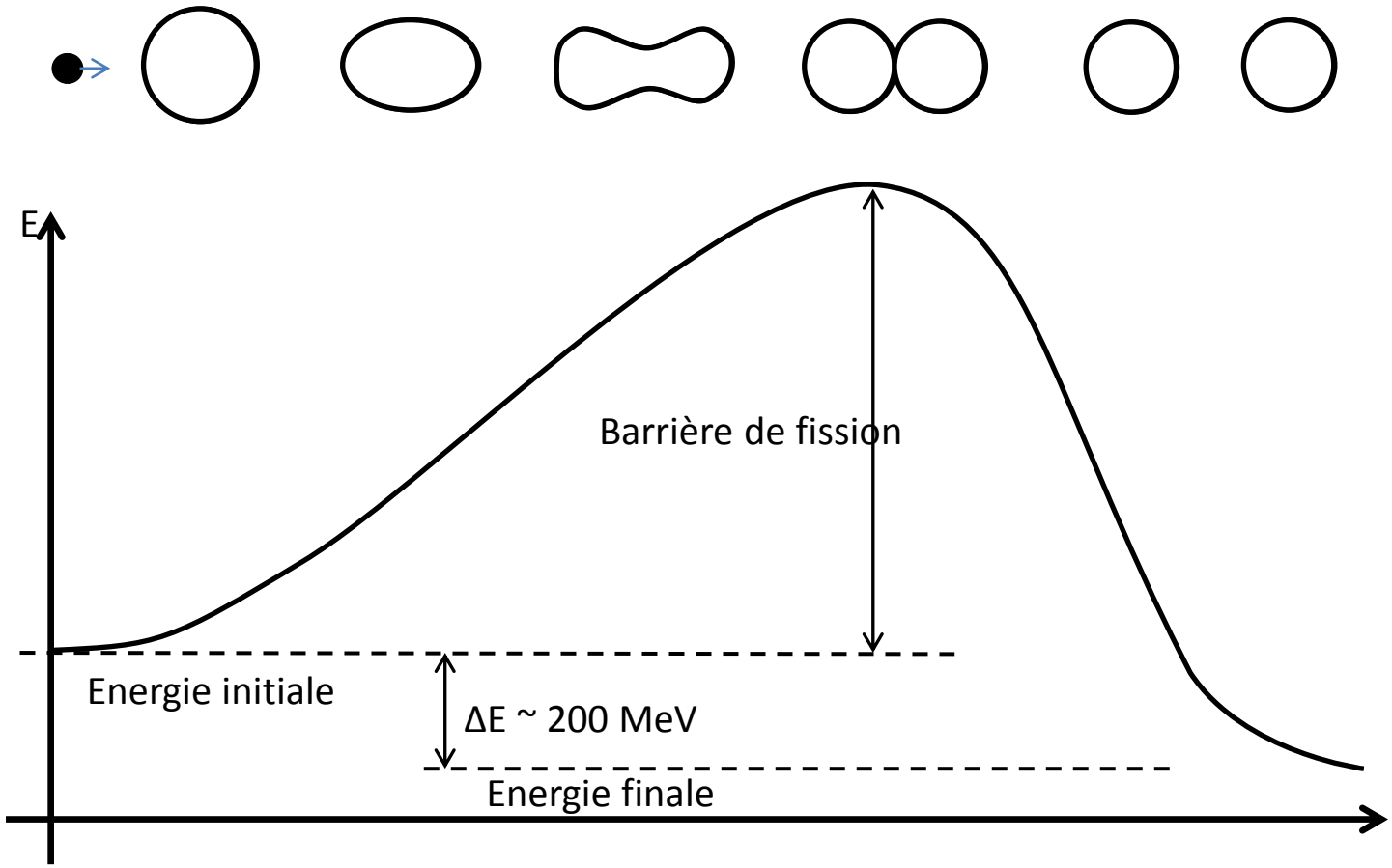




1 réaction de fission (200 MeV) = 8 millions de réaction de combustion

L'énergie des noyaux

➢Comment provoque-t-on la fission ?

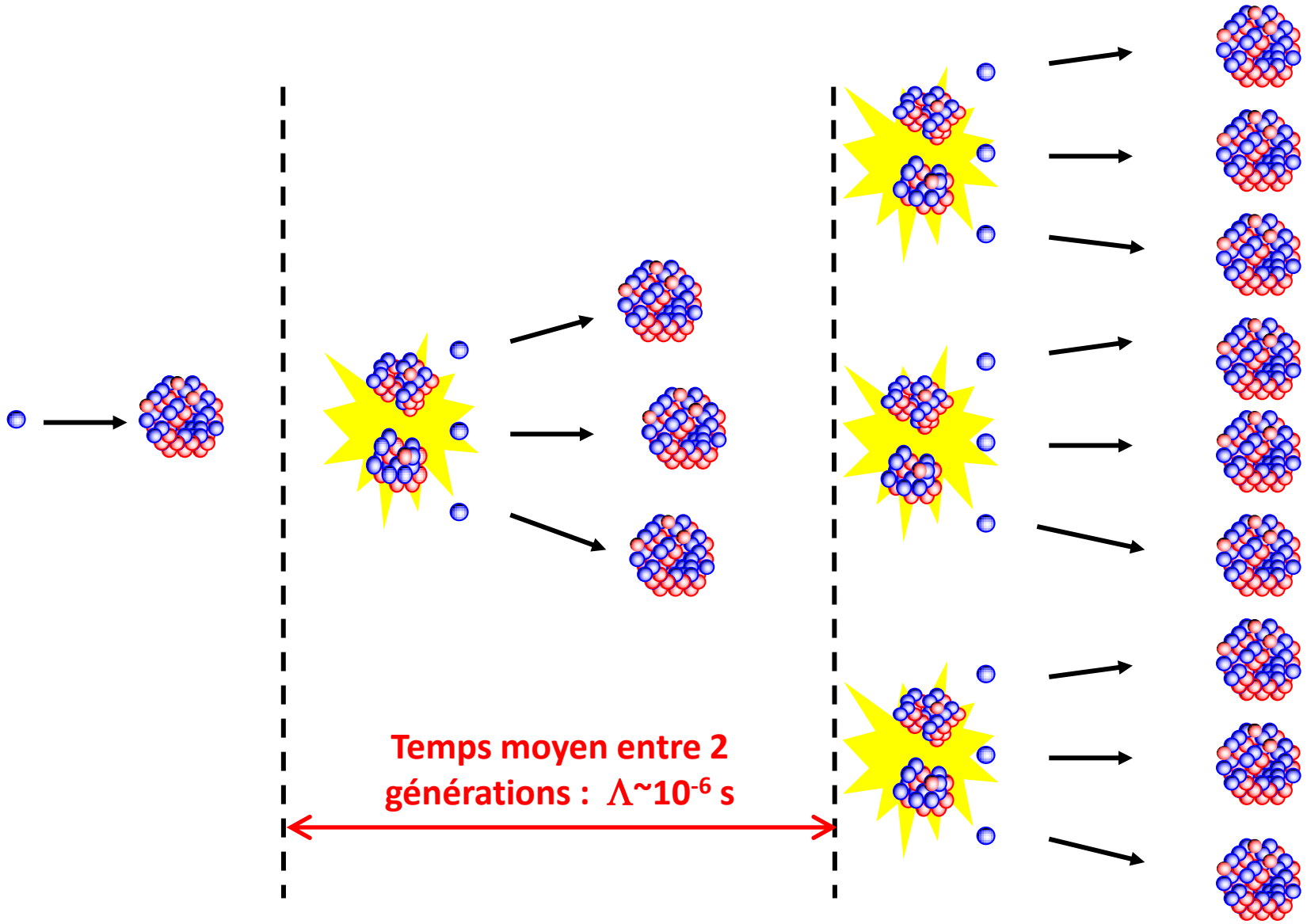


➢L'énergie apportée par un neutron d'énergie cinétique nulle est suffisante pour provoquer la fission d'un noyau d'U-235

➢200 MeV ? C'est beaucoup ?

La fission et la réaction en chaine :

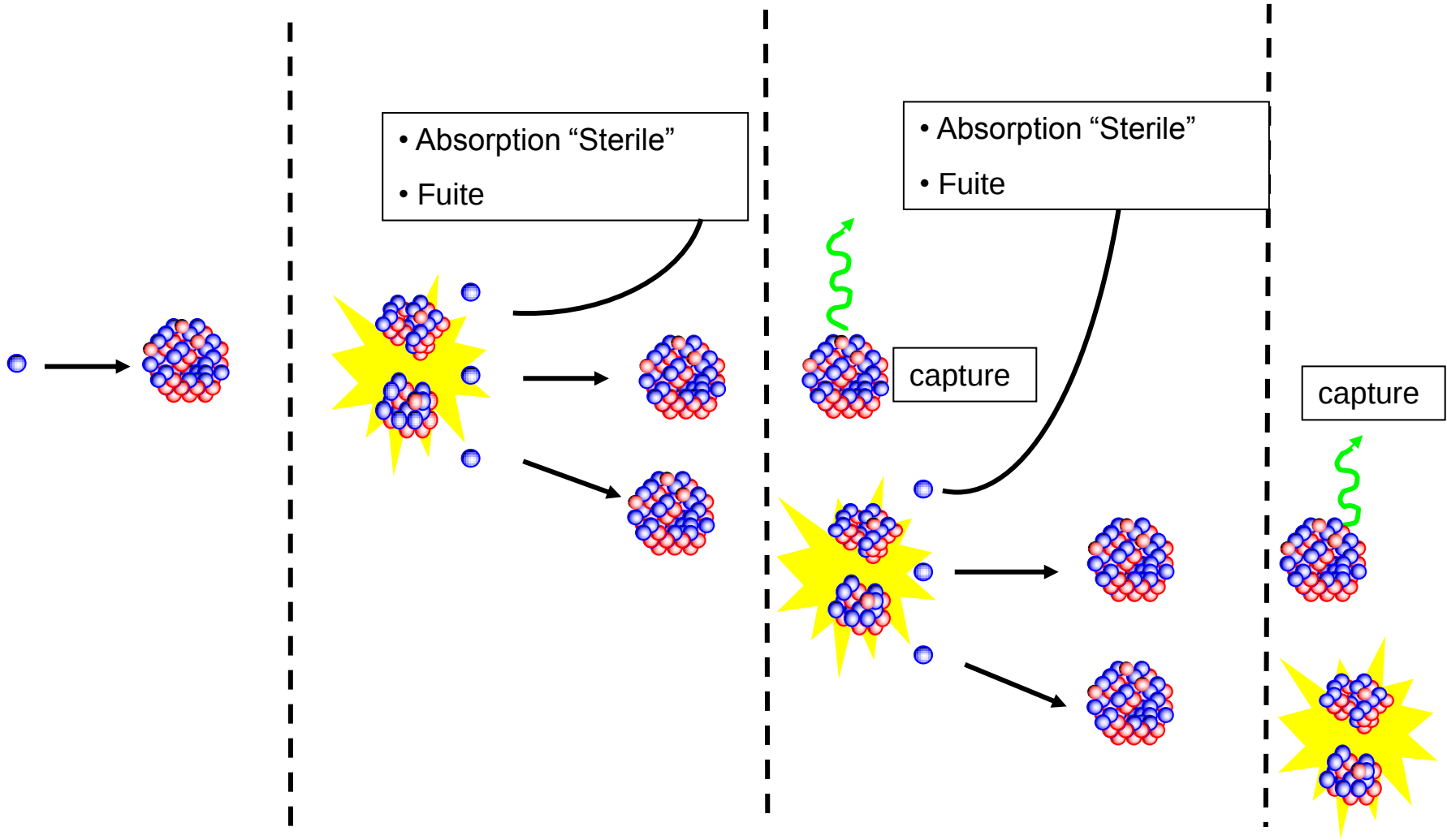
- *La fission des noyaux lourds libère entre **2 et 3 neutrons,** produit deux **fragments de fission et** une grande quantité d'énergie **(200 MeV)***



La fission et la réaction en chaine :

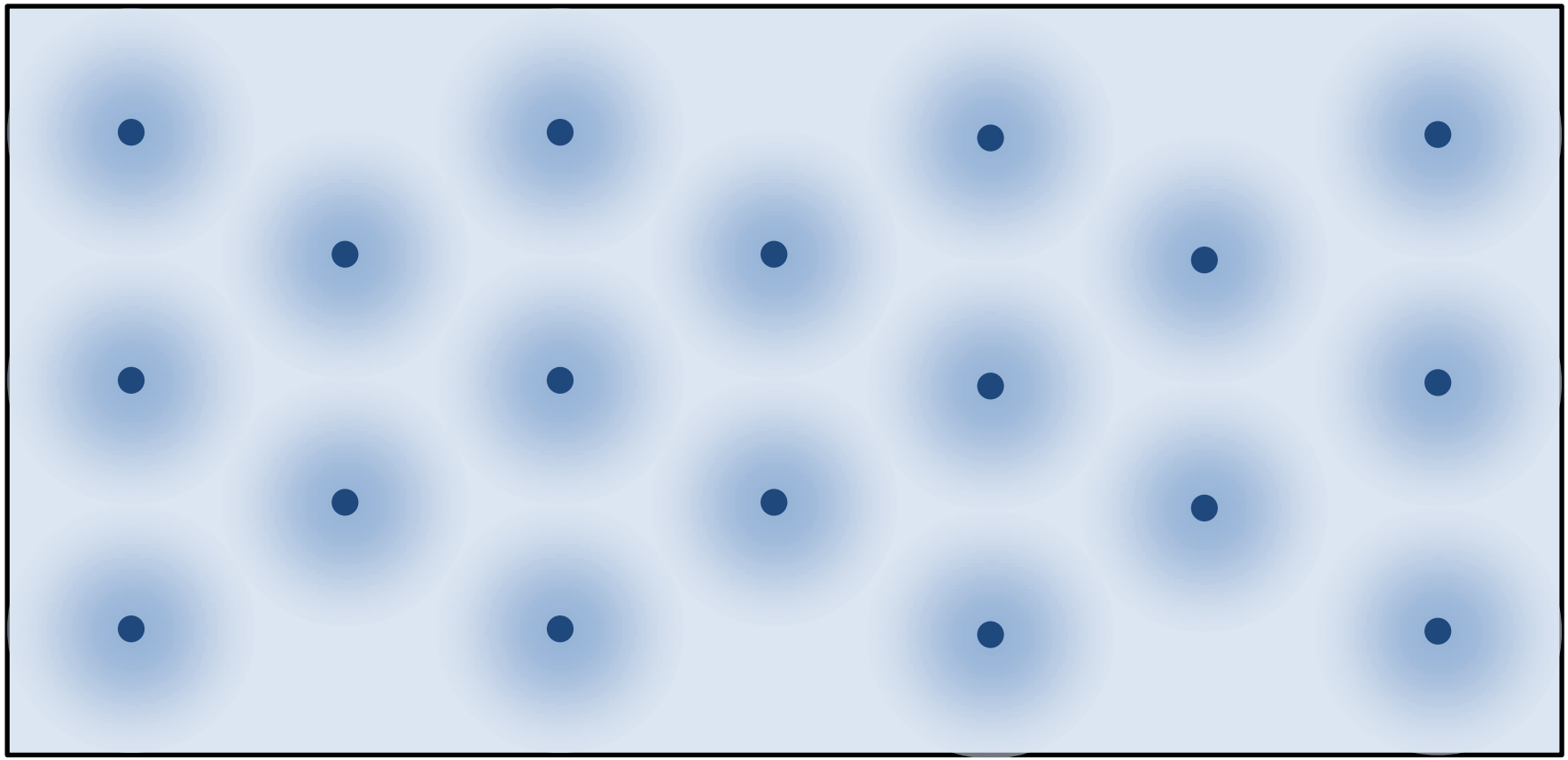
On définit la criticité (ou la réactivité) ou la multiplication des neutrons (k)

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

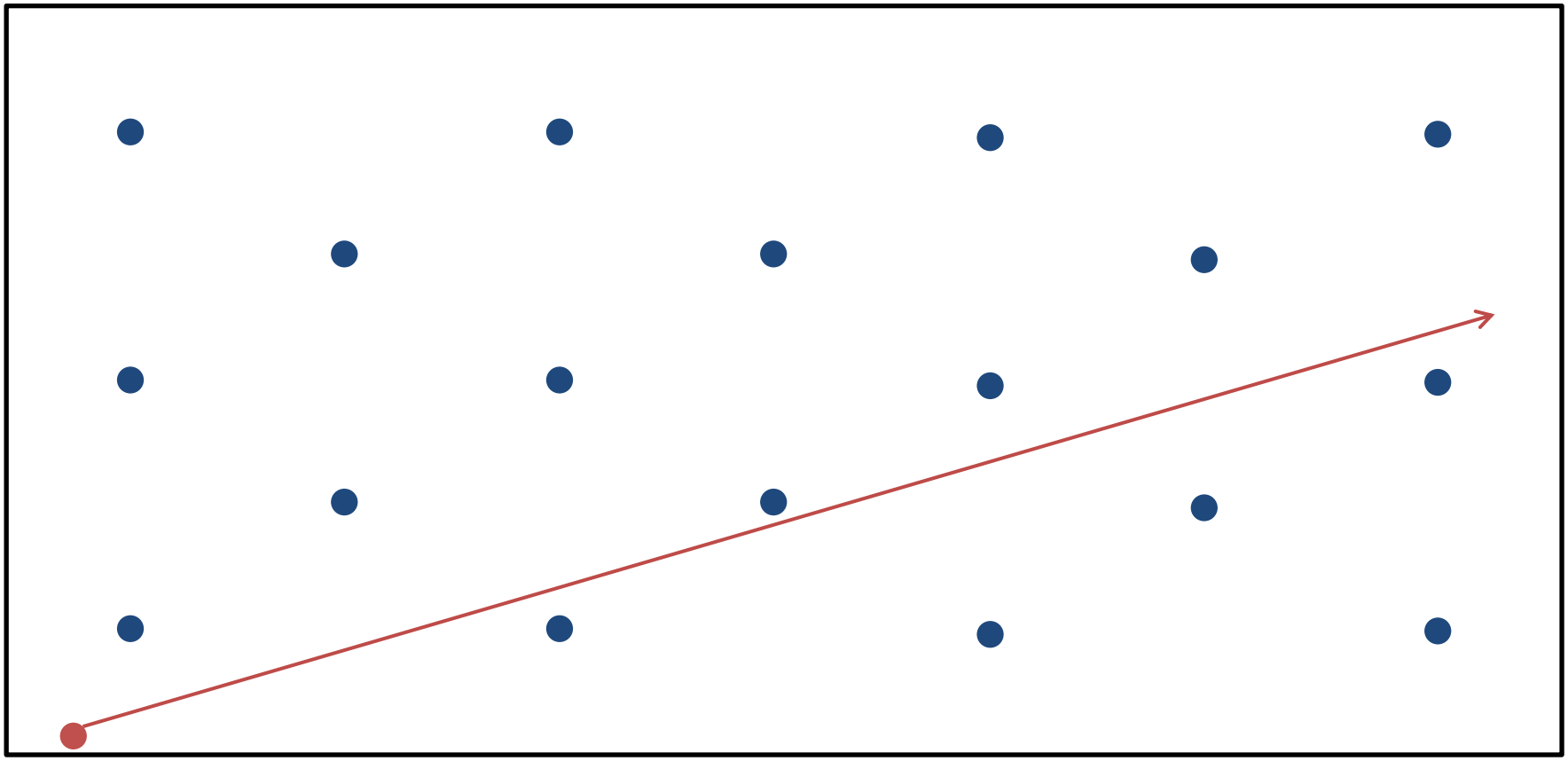


Réaction stable → Nombre de fission par seconde (= puissance) constant

L’interaction des neutrons avec la matière et la criticité



L’interaction des neutrons avec la matière et la criticité



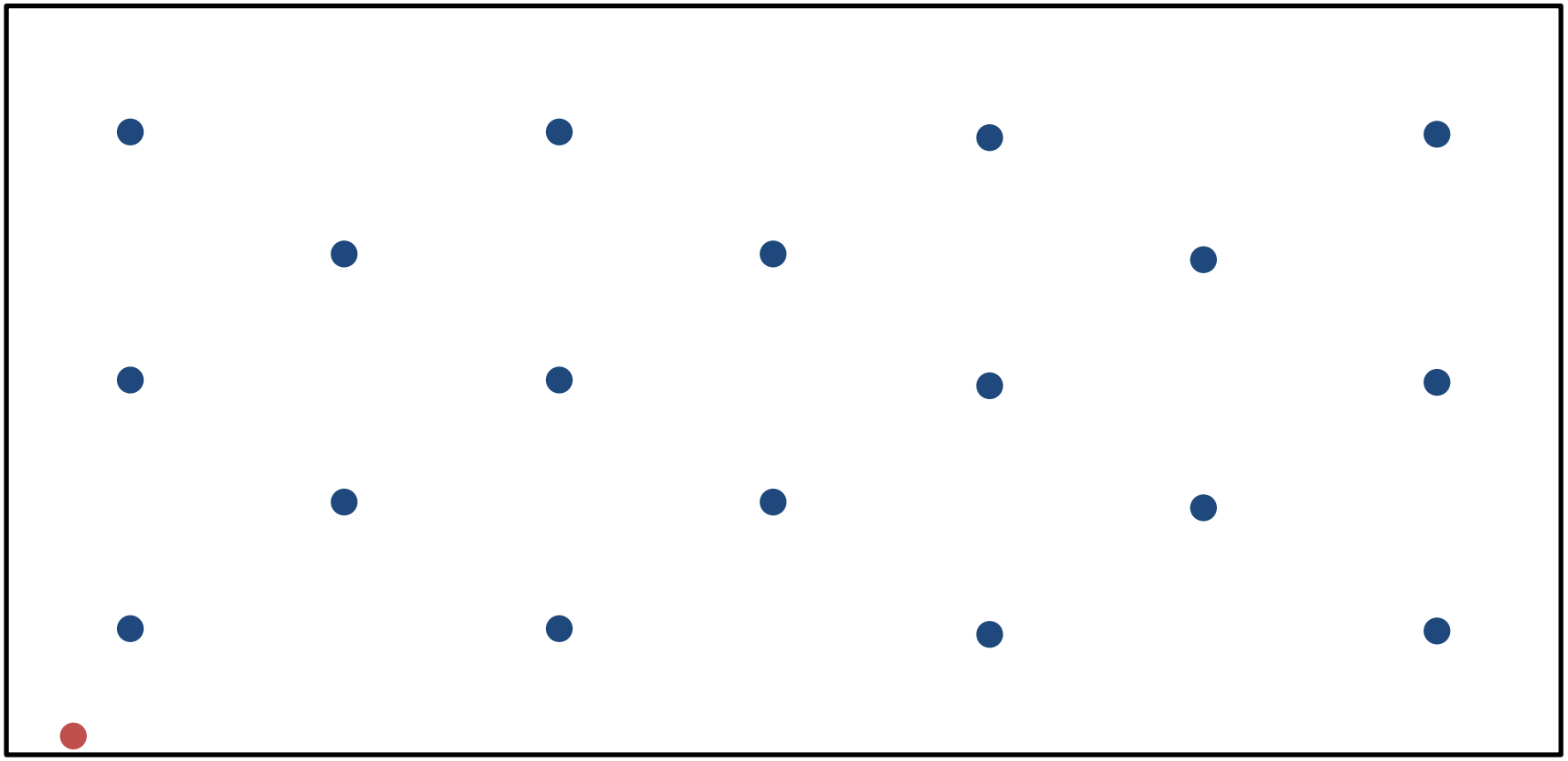
Les neutrons parcourent de grandes distances sans interagir avec la matière

Pas de système nucléaire de taille « microscopique »

L’interaction des neutrons avec la matière et la criticité

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

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

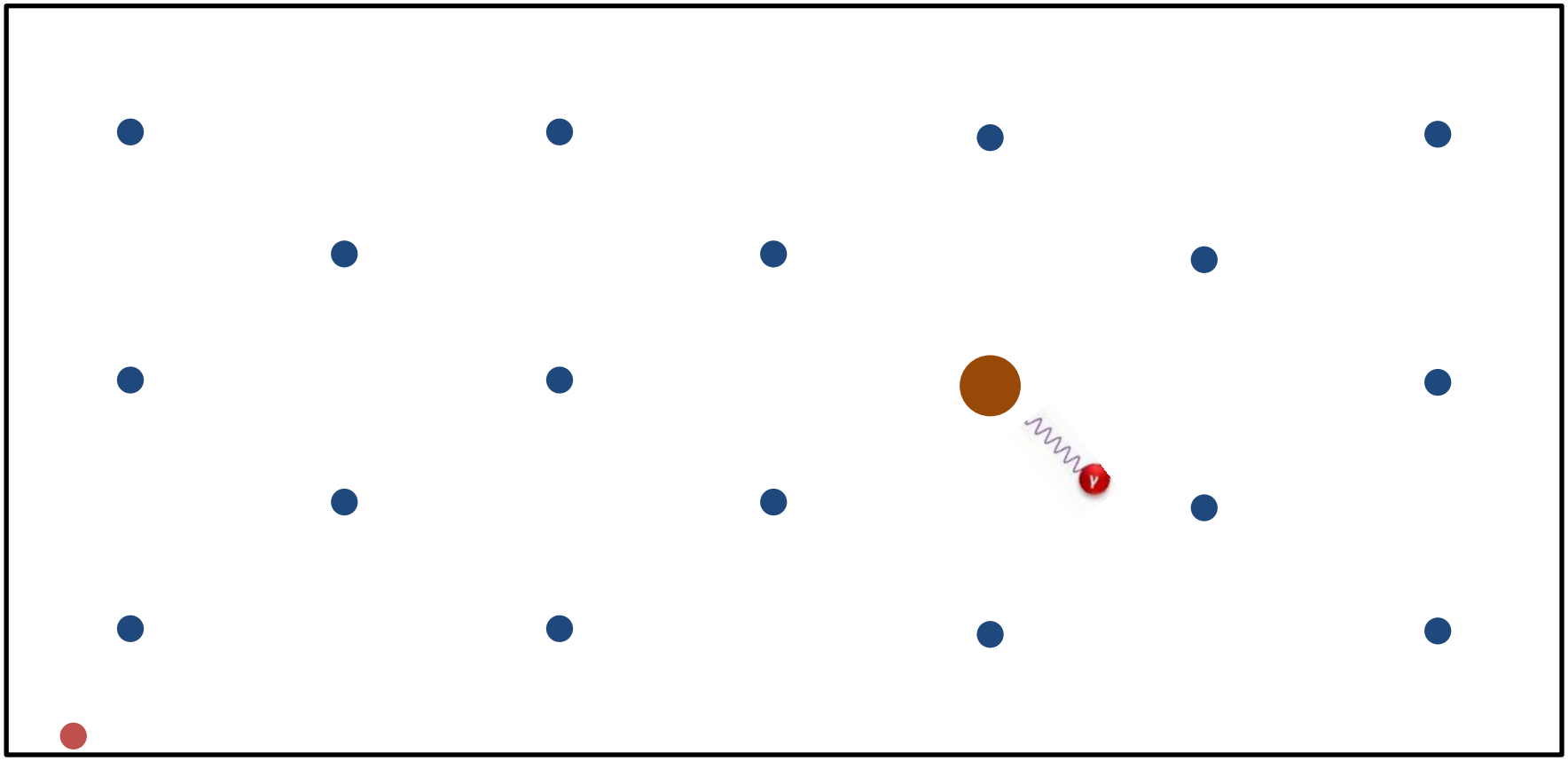


L'interaction des neutrons avec la matière et la criticité

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

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

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



Si la cible est fissile (^{235}U, ^{239}Pu, …), l'absorption peut provoquer une fission

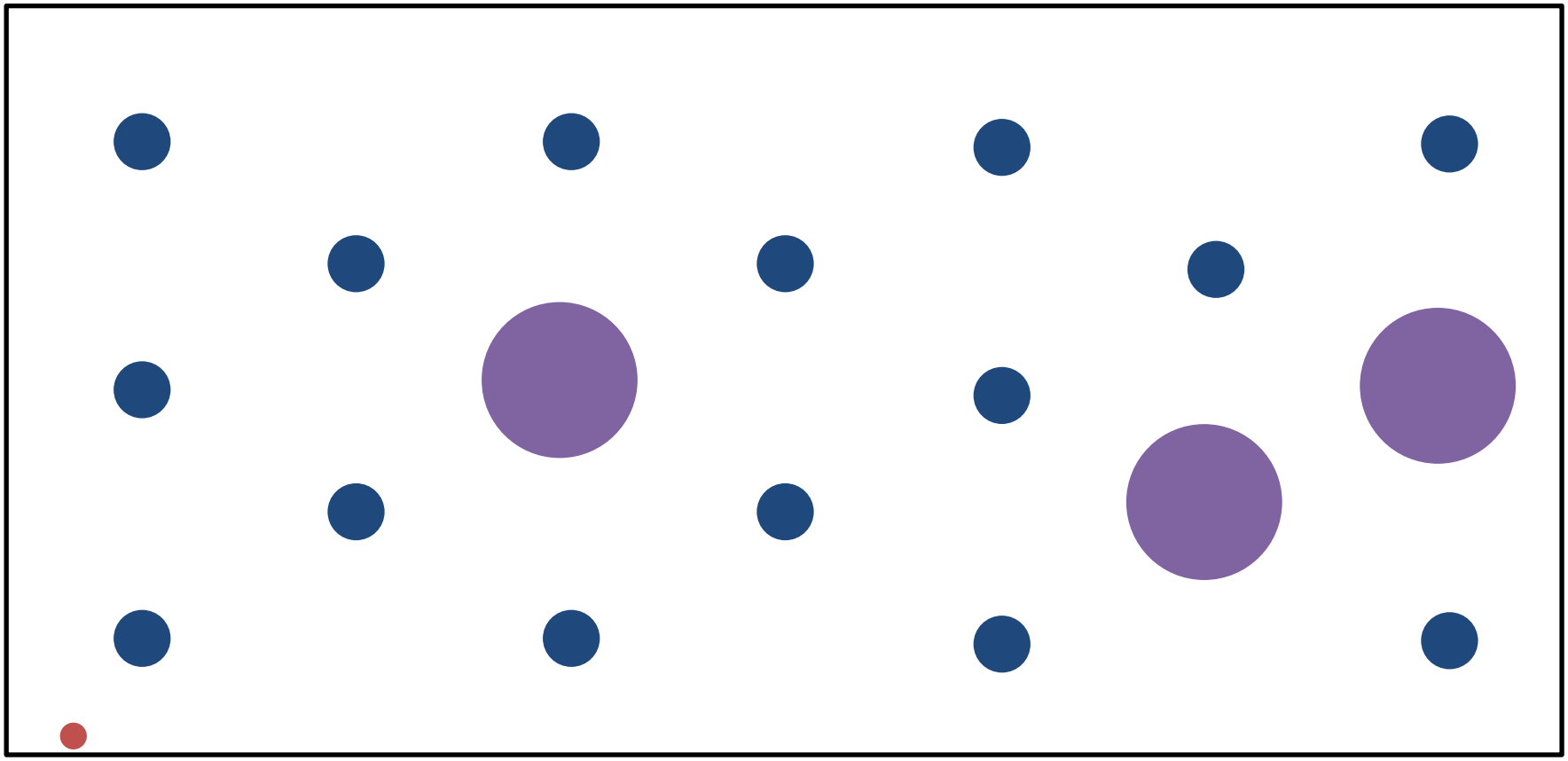
→ Bilan neutronique = +1,5 neutrons

Dans les autres cas, l'absorption est dite stérile

→ Bilan neutronique = -1 neutron

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

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



- Rappel : on cherche le taux de production (de fission)

Taux de réaction r sur le noyau i ($réaction.s^{-1}.cm^{-3}$)

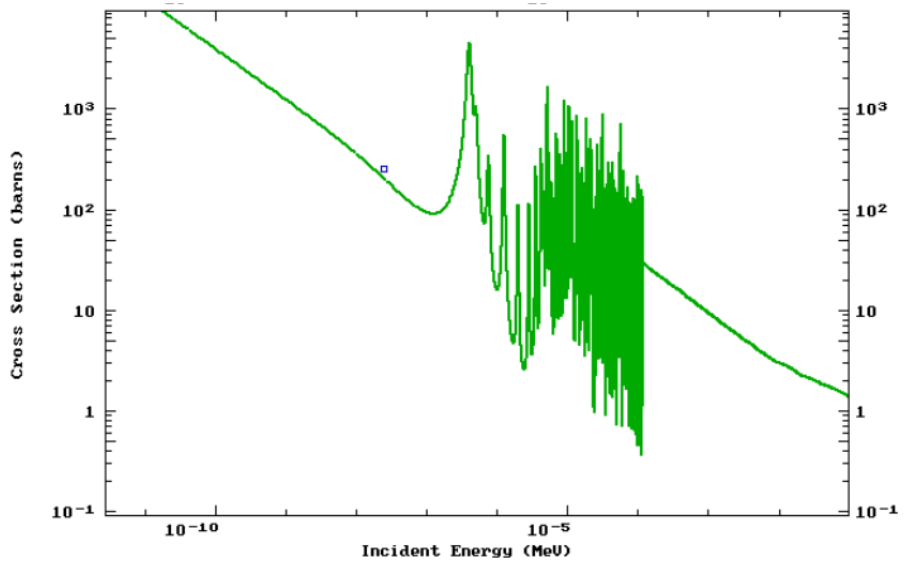
$$R_{r,i} = N_i \times \sigma_{r,i} \times \Phi$$

Flux de neutrons ($neutrons.s^{-1}.cm^{-2}$)

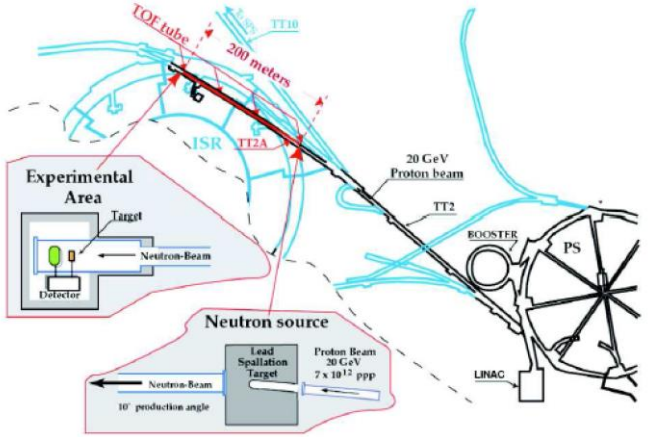
Densité de noyau i ($noyau.cm^{-3}$)

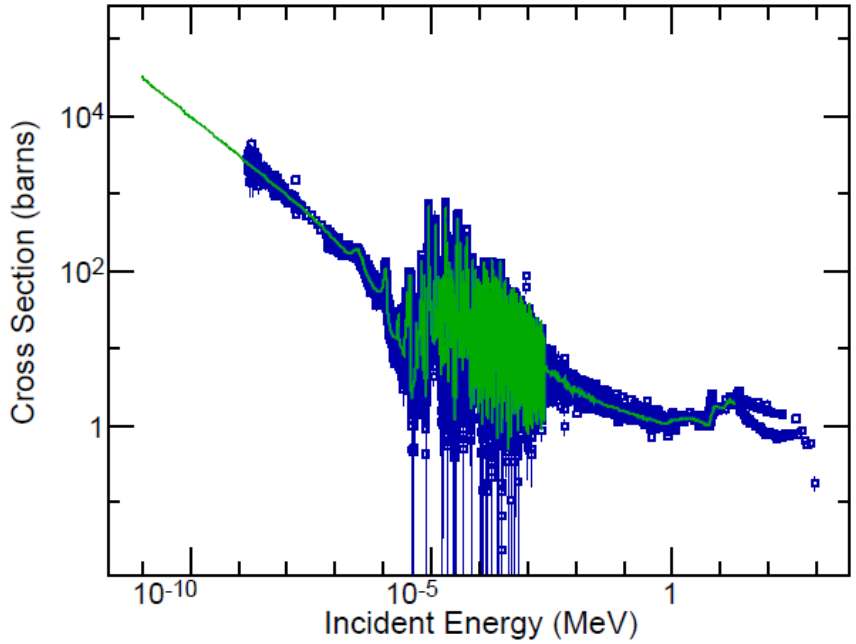
La physique nucléaire à la rescousse…

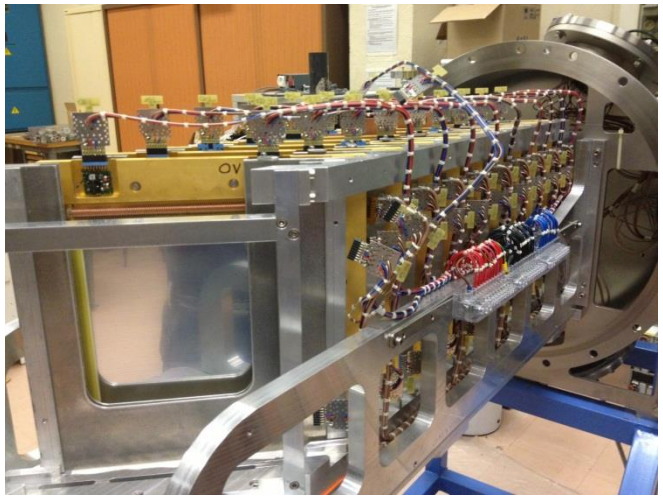
Pour avoir une donnée, on commence par des mesures… …et on utilise des modèles



IN2P3 et IRFU réalisent des mesures de très haute précision





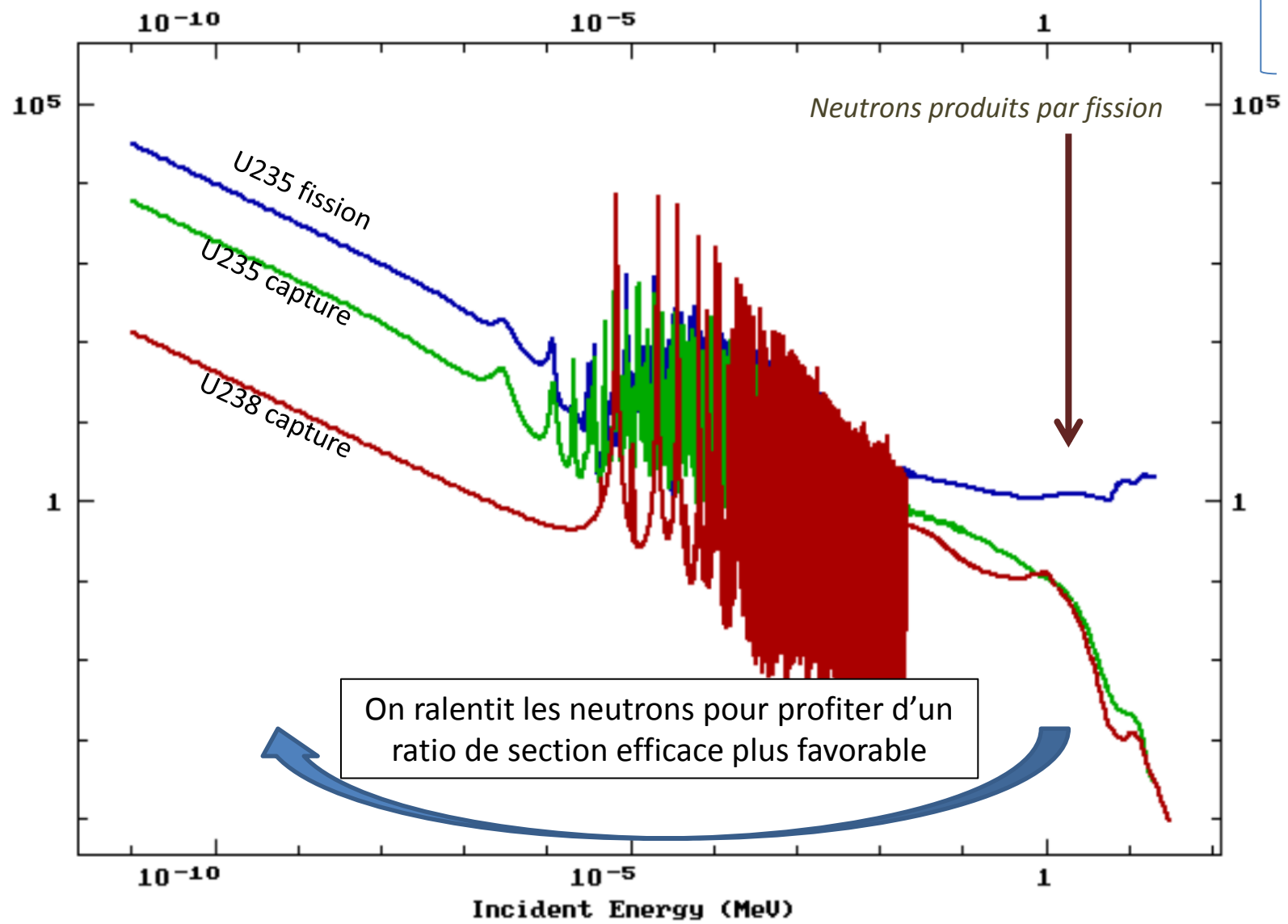


L'interaction des neutrons avec la matière et la criticité

- $\sigma_{r,i}$ représente la probabilité d'interaction entre 1 neutron et 1 noyau
  → Pour représenter l'interaction avec la matière, on considère $\Sigma_{r,i} = N_i \sigma_{r,i}$
- L'uranium 235 ne représente que 0,7% de l'uranium naturel

$$k = \frac{production}{disparition}$$

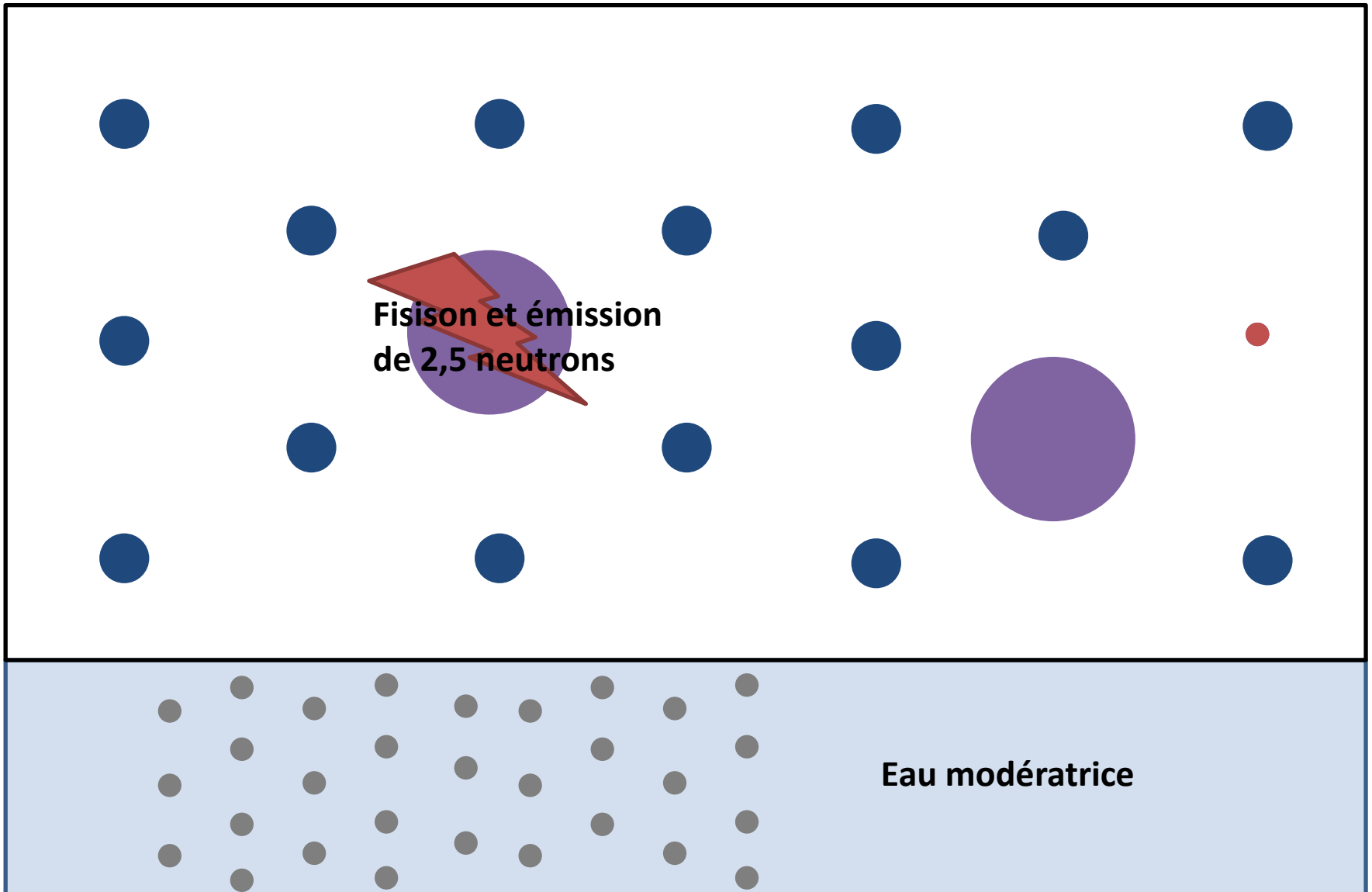
$$= \frac{\nu N_{U235} \sigma_f \phi}{\sum_{i,r} N_{i,r} \sigma \phi}$$



L'interaction des neutrons avec la matière

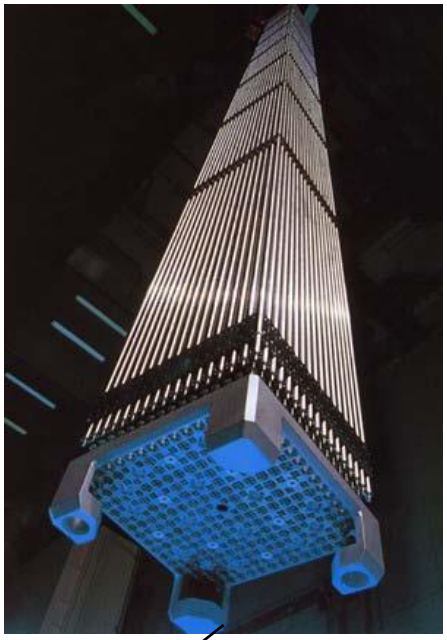
- L'eau dans les réacteurs est indispensable pour :
  - → Refroidir le combustible
  - → Ralentir les neutrons

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

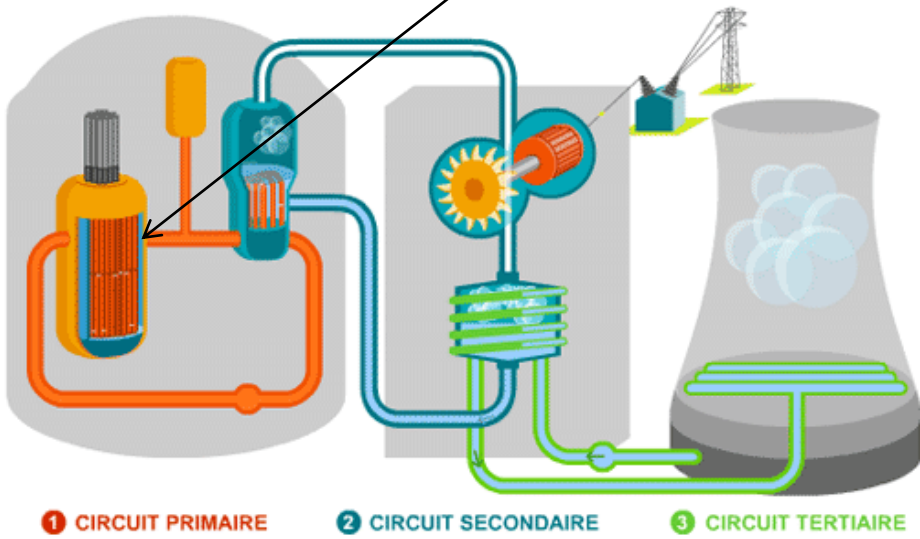


Les réacteurs à eau sous pression

- Résultat d'un compromis entre ralentissement et enrichissement
  - → Uranium enrichi entre 3 et 5%
  - → Chaque assemblage est constitué de 264 crayons (17 x 17)

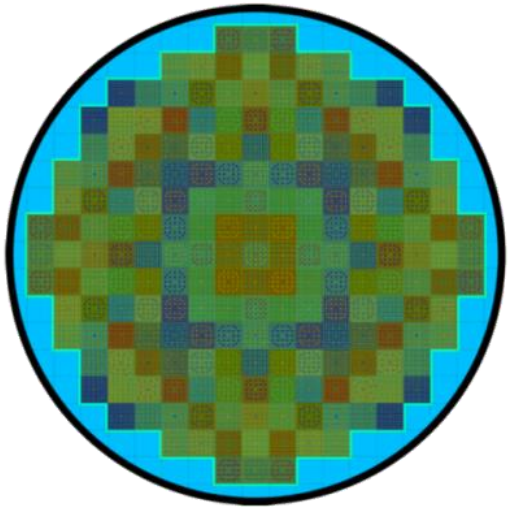


L'eau circule dans l'espace entre les crayons - refroidit le combustible et ralentit les neutrons



L'équation du transport

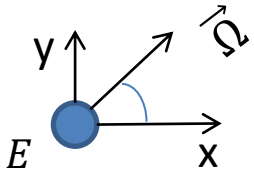
➢ La simulation de réacteurs : un enjeu de recherche pour la sûreté et les scénarios



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

Libre parcours moyen des neutrons $\sim cm$
Section assemblage $\sim 20\ cm$ x $20\ cm$
Hauteur du cœur $\sim 4\ m$
Énergie des neutrons de $10^{-3} eV$ à $10^{8} eV$

Neutron :



position $\vec{r}$ | énergie E | direction $\vec{\Omega}$

Équation du transport des neutrons :

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

Variation du flux neutronique | ***Fuites*** | ***Réaction*** | ***Réaction de transfert*** | ***Source de fission***

$\Sigma = N.\sigma$

Inconnue : $\boldsymbol{\Phi = \Phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)}$ → Taux de réaction = $N\ \sigma\ \Phi$

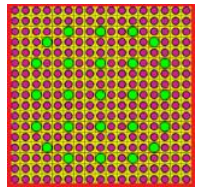
Une simulation en deux étapes

Résolution de l'équation du transport impossible → système matriciel trop complexe !

Calcul cellule

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

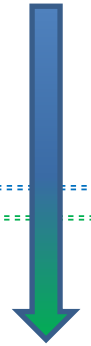
$$\frac{1}{v}\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\,div(\vec{\Omega}\,\Phi) - \Sigma_{tot}\Phi + \int_{\vec{\Omega}',E'} \Phi'\Sigma' f \; d\,\vec{\Omega}'\, dE' + \int_0^{\infty} \mathrm{X}(E)\nu\Sigma_f dE$$



Angle $\vec{\Omega}$ — ***Approximation de la diffusion*** → $\vec{J} = -D\ grad\ \Phi$

Énergie E — ***condensation***

Espace $\vec{r}$ — ***homogénéisation***

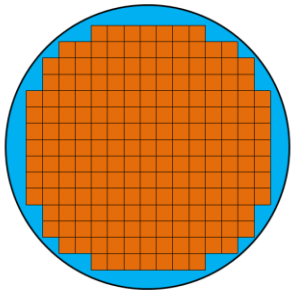


Calcul cœur

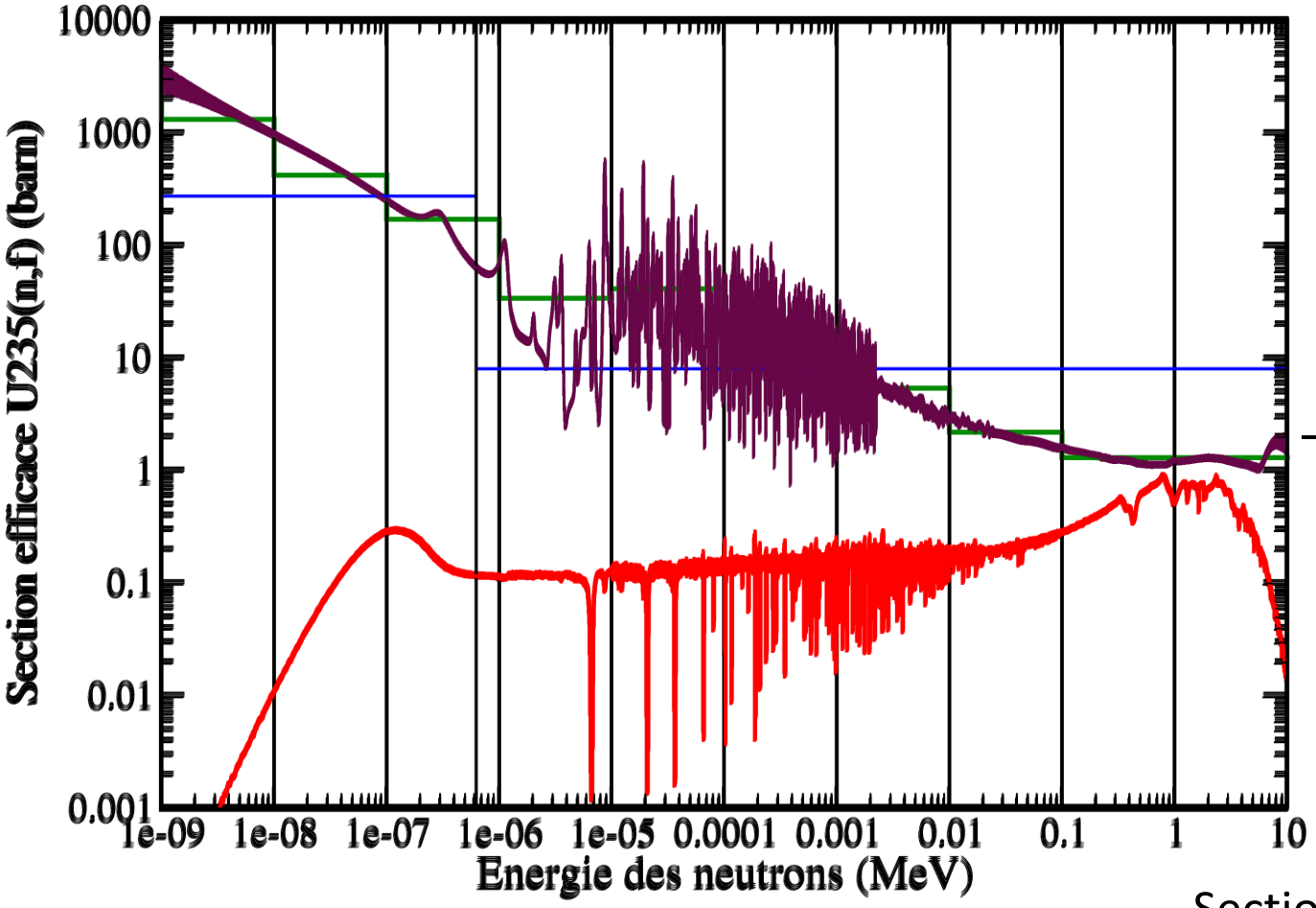
$$\Sigma = N.\sigma$$

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

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



Le passage du calcul cellule au cœur : la condensation en énergie



Section efficace microscopique

$\sigma_{fiss}^{^{235}U}$

$$-D\,\Delta\Phi = \nu\,\Sigma_f\Phi - \Sigma\Phi$$

$$\Sigma = N.\sigma$$

Flux neutronique

$\boldsymbol{\Phi(E)}$

Flux multigroupe :

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

Section efficace multigroupe :

$$\sigma_g(\vec{r}) = \frac{\int_g \sigma(\mathrm{E})\Phi(\vec{r},E)dE}{\int_g \Phi(\vec{r},E)dE}$$

Y a pas une arnaque ? Rappel : $\Phi(\vec{r},E)$ est l'inconnue

Plan du cours

Ce qu'il faut retenir

- Il n'existe qu'un seul noyau **fissile** sur terre : **l'U-235**
  - Il ne représente que **0,7% de l'uranium naturel**

- La réaction en chaîne de fission **(criticité)** est possible en :
  - Utilisant des **neutrons thermiques**
  - **Enrichissant** le combustible en **noyaux fissiles**

    → C'est un compromis entre la technologie cycle et la technologie réacteur

- **La simulation** des réacteurs reste un enjeu de recherche pour
  - La **sûreté** (savoir ou est produite la puissance thermique dans le cœur)
  - Les **scénarios** (connaitre la production des **déchets et la consommation des ressources**)

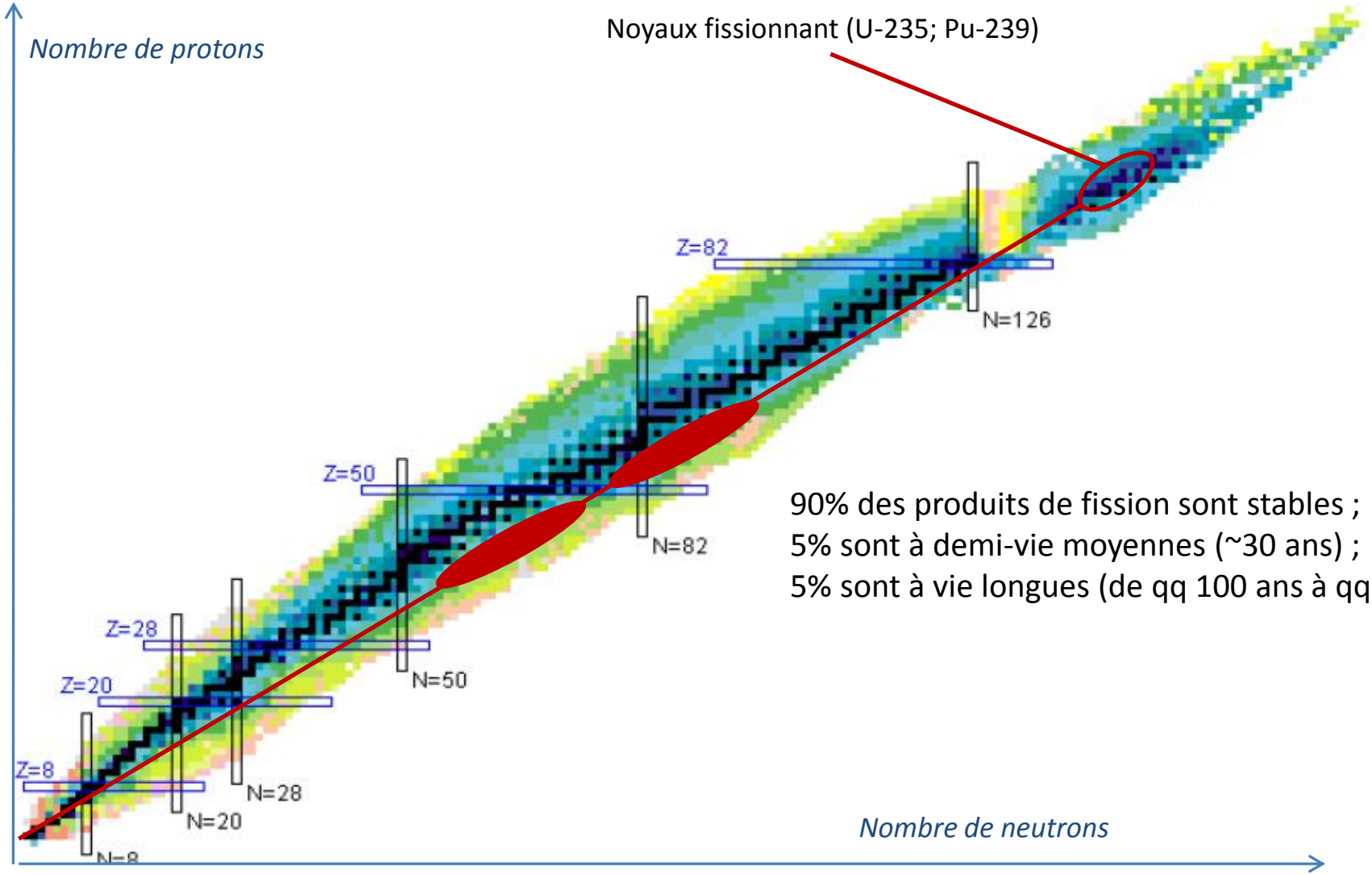
1/Physique nucléaire et physique des réacteurs

2/ Les déchets nucléaires

Qu'est ce qu'un déchet nucléaire ?
Spécificité des déchets nucléaires : la radioactivité
Le débat CIGEO
L'intérêt de la stratégie française

3/ Les ressources en uranium naturel
4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation
Conclusions

La fission



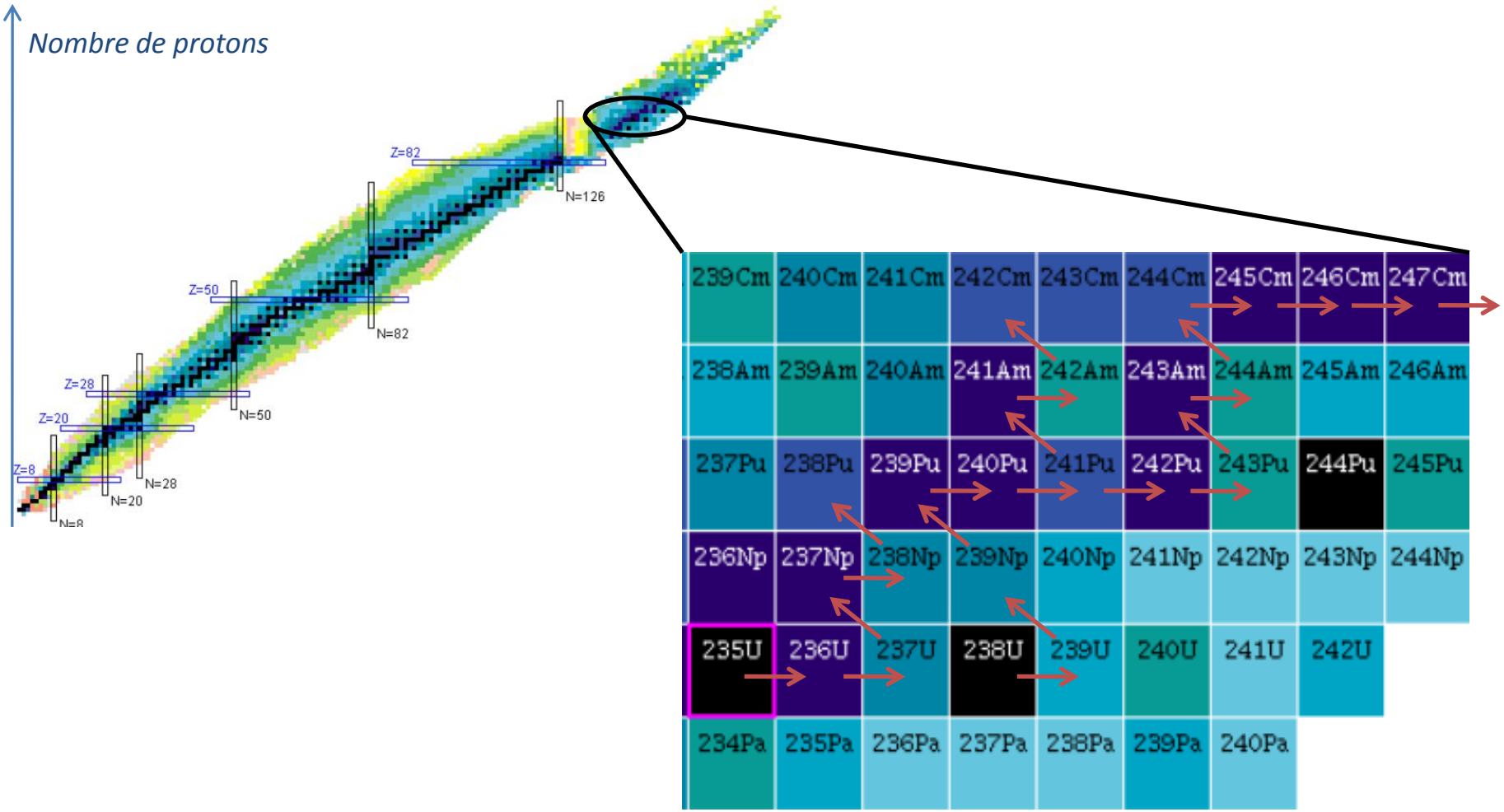
90% des produits de fission sont stables ;
5% sont à demi-vie moyennes (~30 ans) ;
5% sont à vie longues (de qq 100 ans à qq 10^6 ans)

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 le dégagement de chaleur correspond à 9000 radiateurs dans un studio parisien

La fission

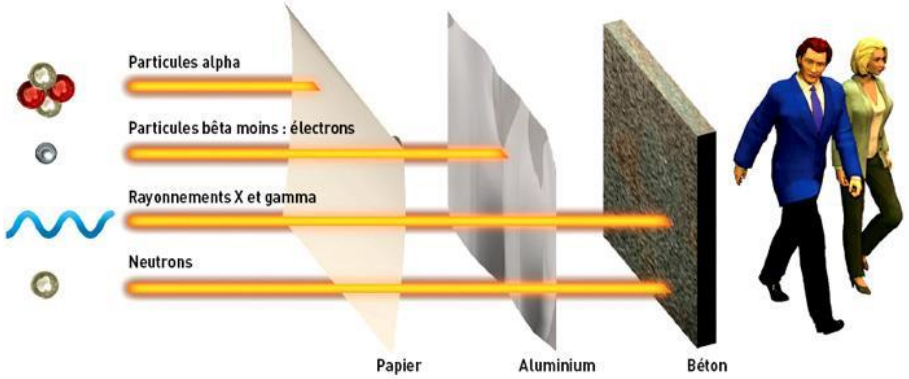


L'irradiation produit des noyaux lourds par captures neutroniques :

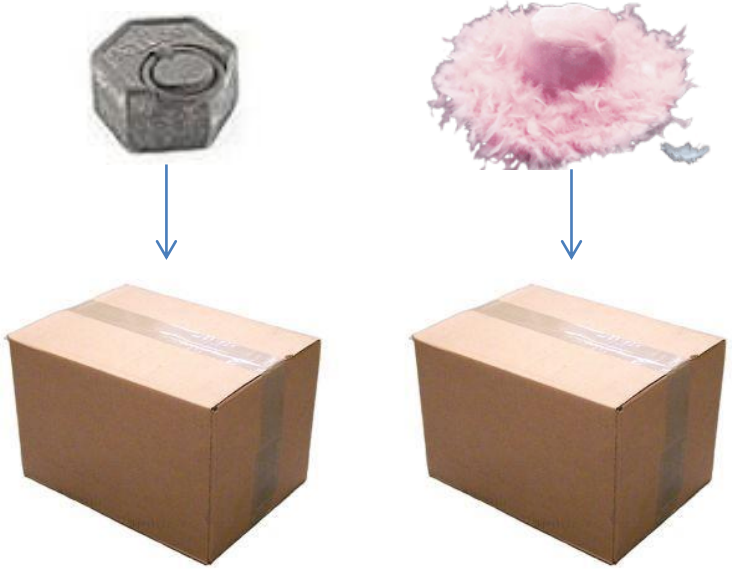
- Le plutonium est produit par capture sur l'238U
- Les autres éléments sont les actinides mineurs !

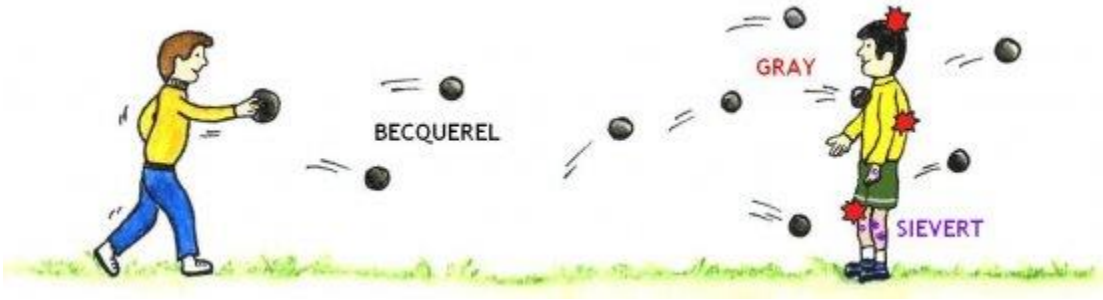
Un point sur les unités (ou pourquoi on n'y comprend rien)

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



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





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

La radioactivité c'est dangereux !

Effet directs à haute dose :

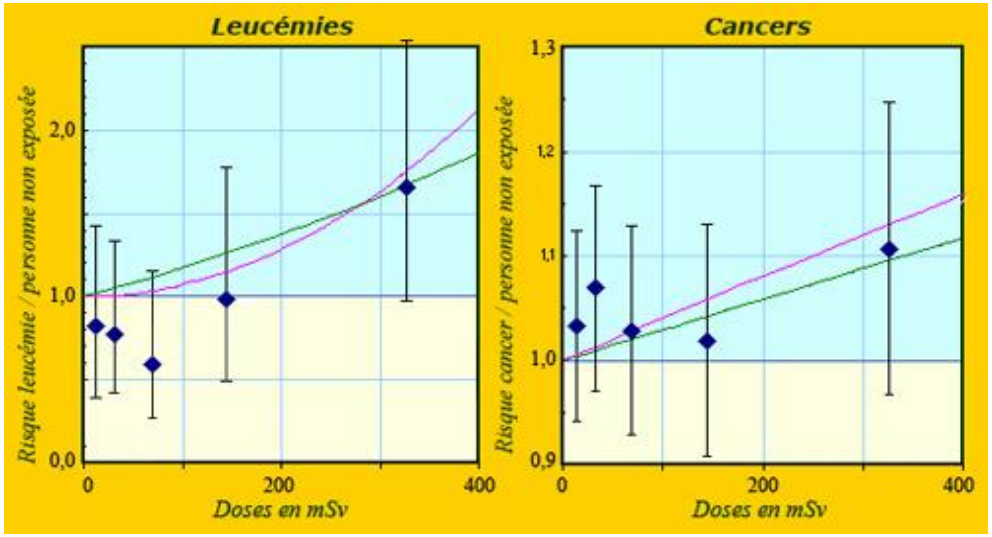
- 40 Sv : Destruction des cellules nerveuses : coma et mort
- 20 Sv : Seuil des brulures
- 10 Sv : Nausée, vomissement : hémorragie digestive létal

Tchernobyl > 47 morts directs en 1 mois suite à l'irradiation

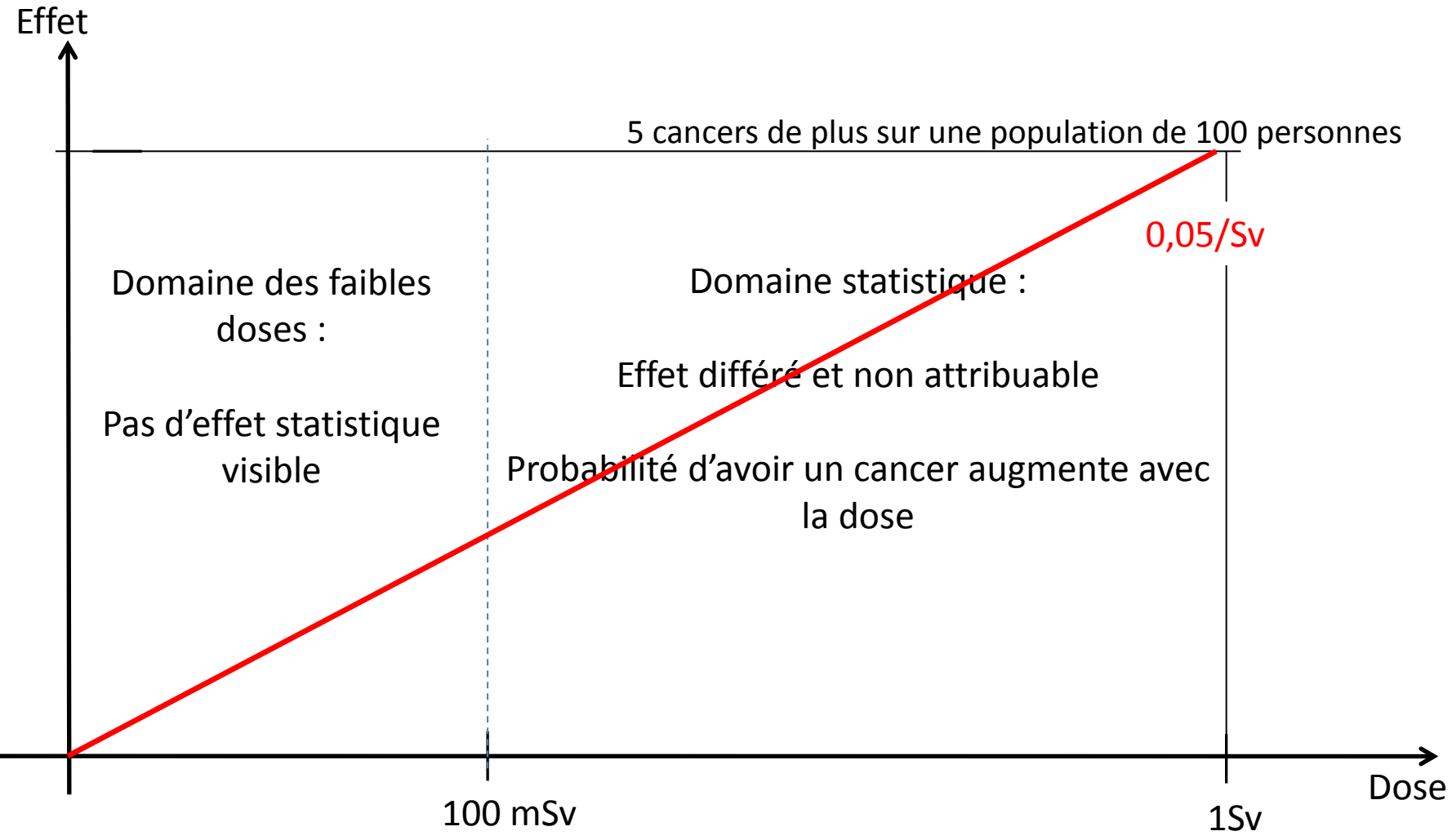
Oui mais… Et la radioactivité naturelle ??

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

Etude sur les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki

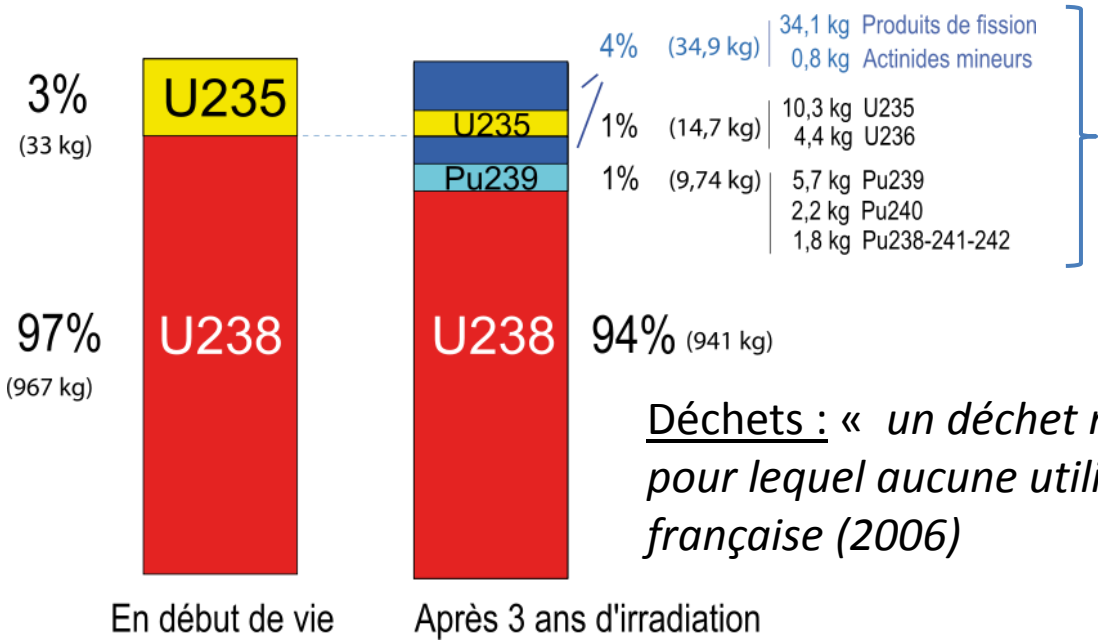


La loi linéaire sans seuil



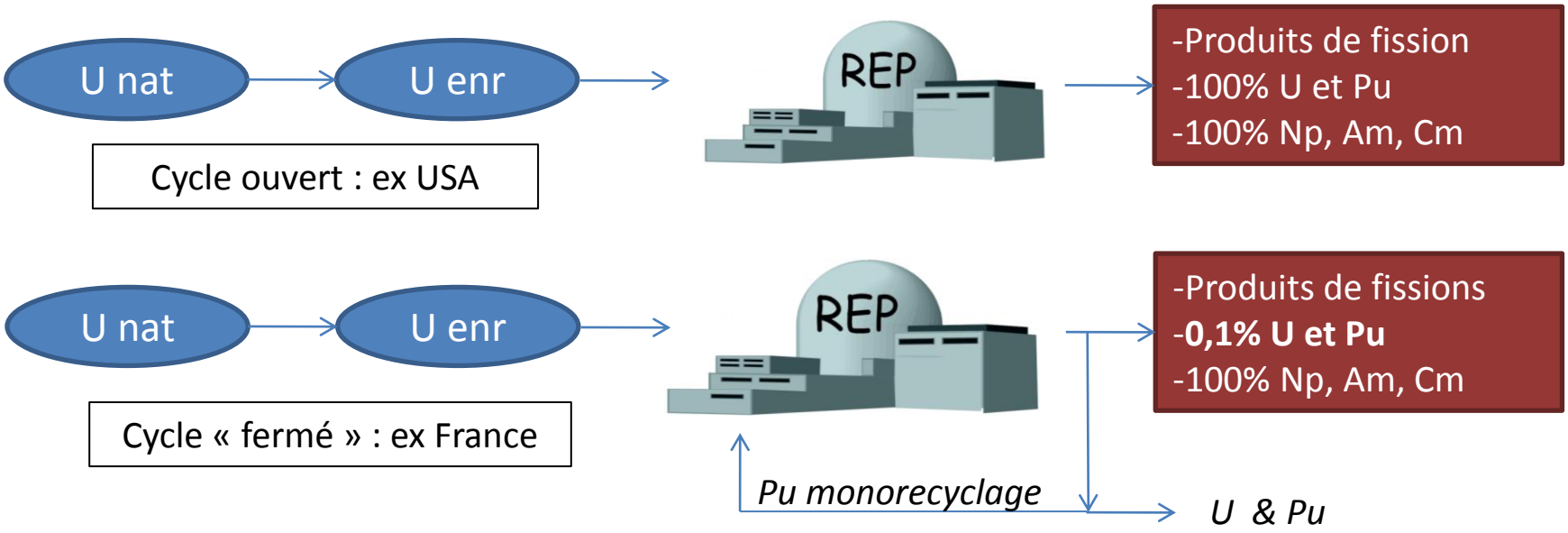
La commission internationale de protection radiologique (CIPR) fait l'hypothèse que l'effet reste proportionnel à la dose

Déchet nucléaire



« 96 % des combustibles usés sont ré-utilisable »

Déchets : « *un déchet radioactif est une matière radioactive pour lequel aucune utilisation n'est prévue ni envisagée» loi française (2006)*



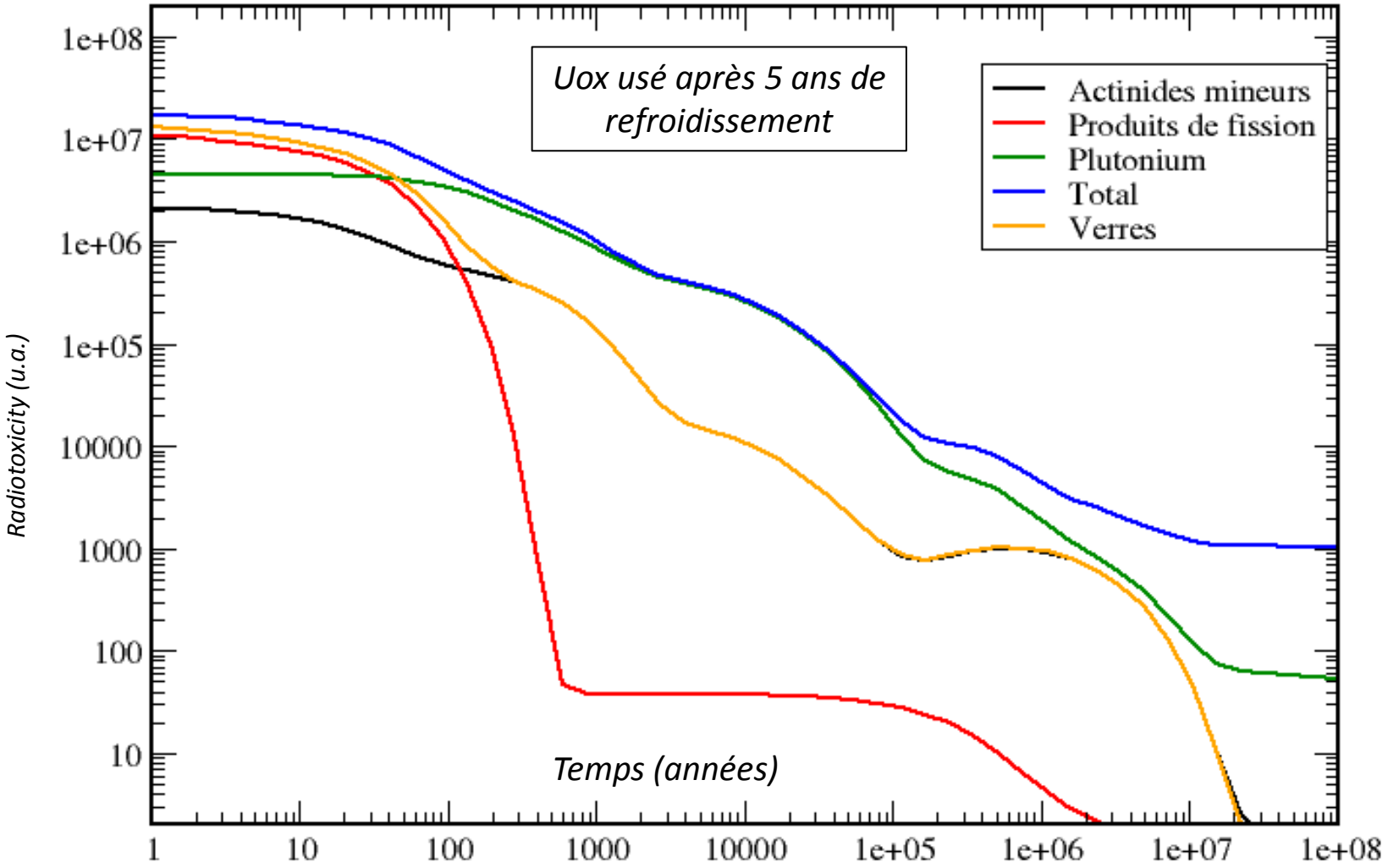
Comment qualifier les déchets nucléaires ?

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

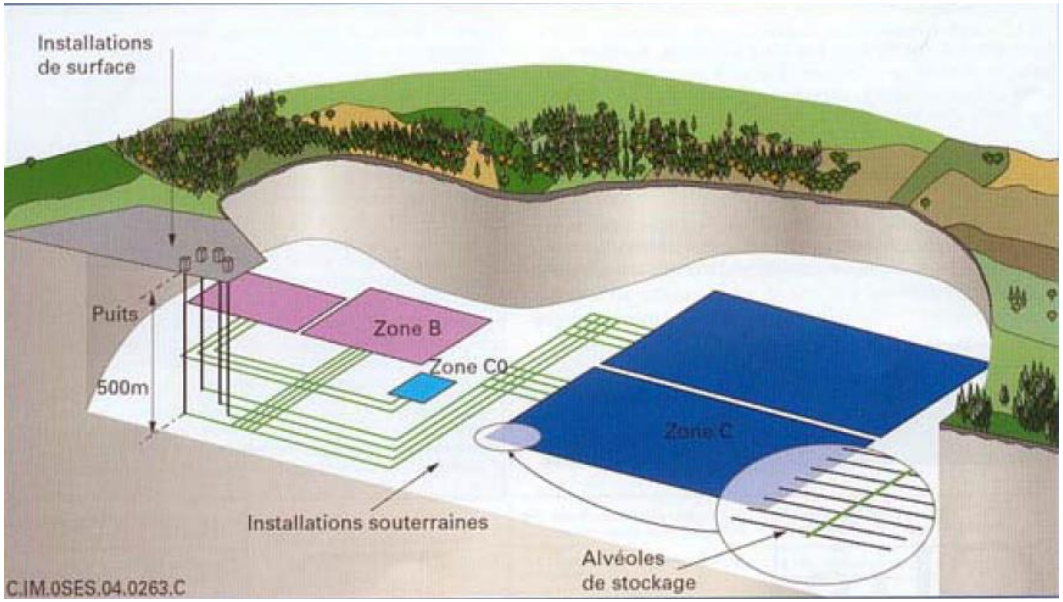
Le sievert est une unité construite pour quantifier les dommages des radiations sur le corps humain

→ *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

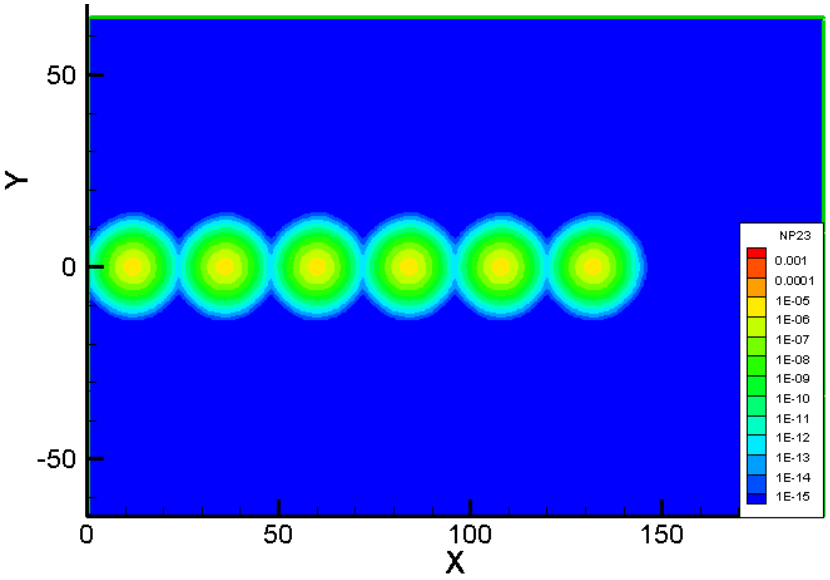


Deux types de déchets à vie longue

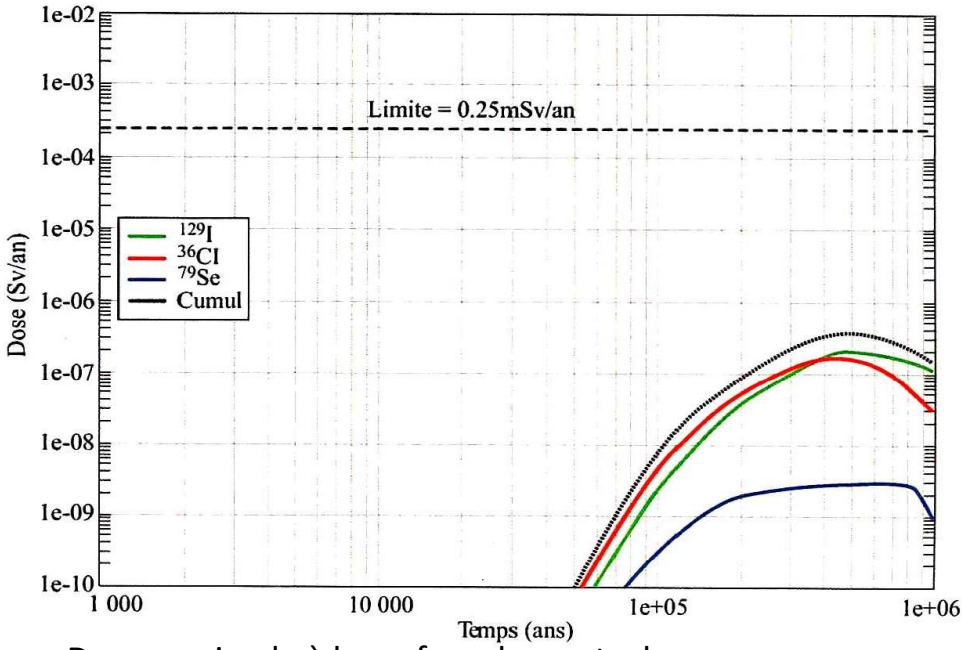
- Haute activité

- Moyenne activité

Est-ce sur ?

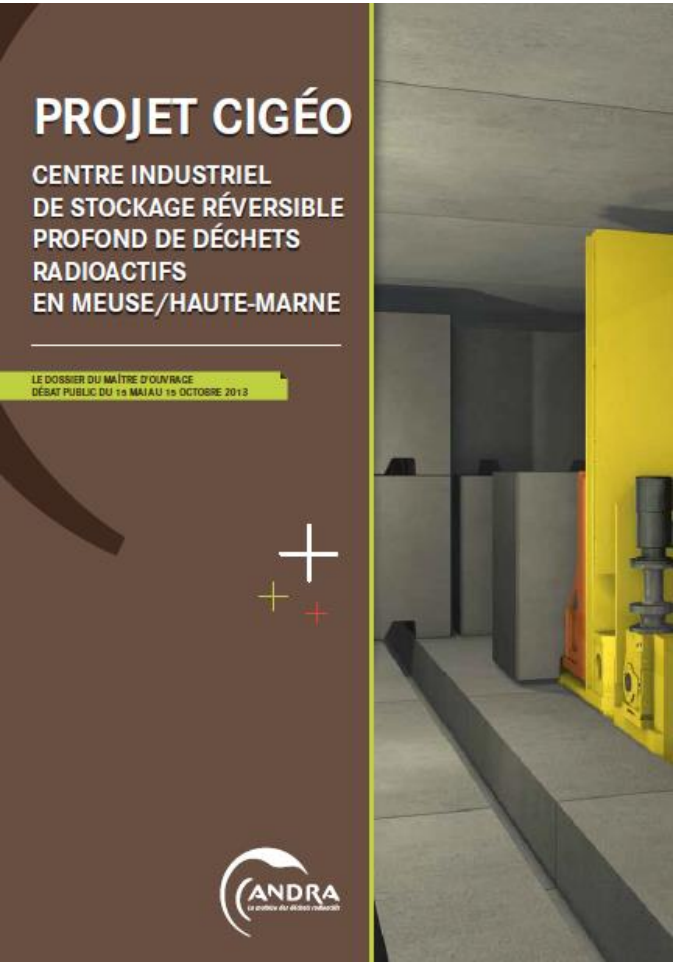


Exemple : diffusion des actinides après 500 000 ans ~ 15 m



Dose maximale à la surface du au stockagee

Le débat public de CIGEO

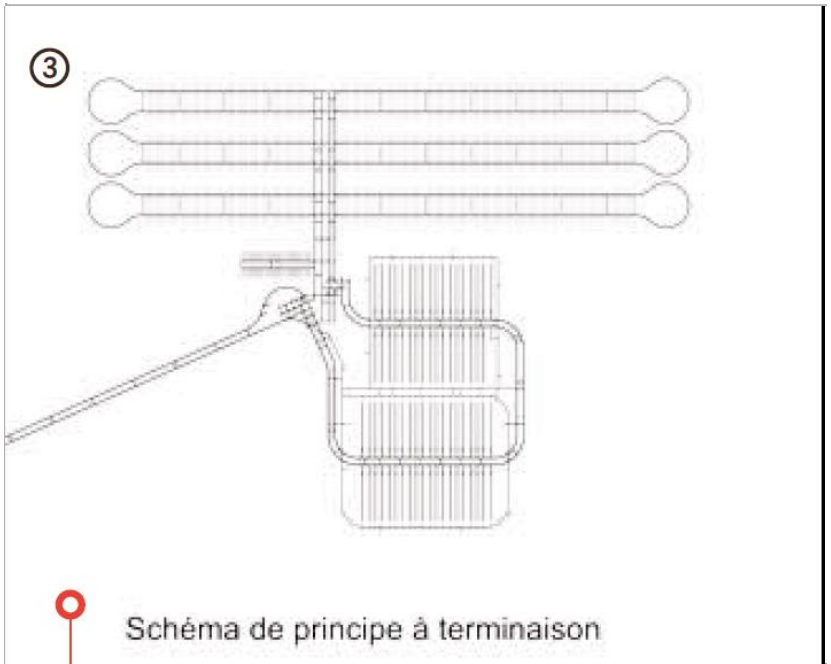


L'inventaire de CIGEO :

	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 m^3**
MA-VL	57 500 m^3	67 500 m^3	59 000 m^3	**70 000 m^3**

- **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

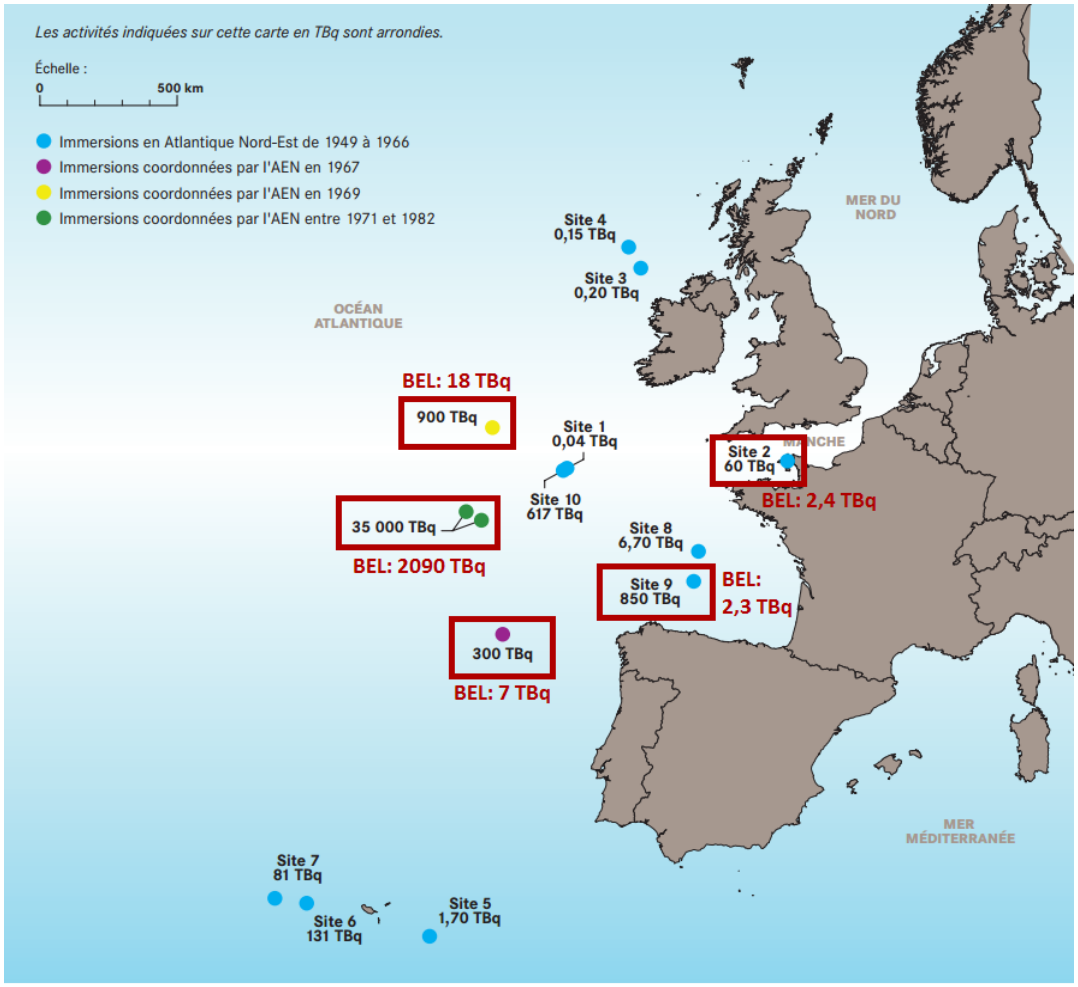


- 5% du total des déchets HA seront installé en 2025 dans CIGEO pour observation pendant 50 ans.
- Le stockage des HA ne débutera donc pas avant 2075 !

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



Quel gain aux combustibles Mox ?

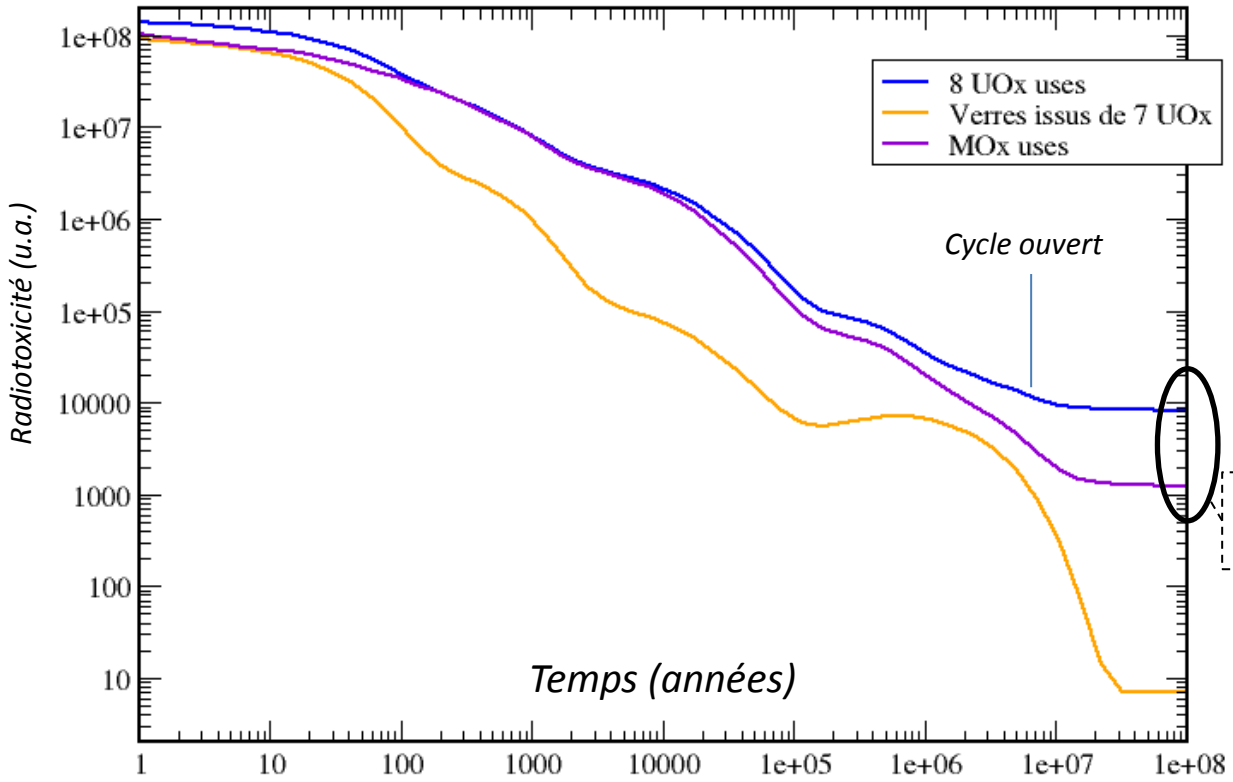
Le plutonium peut être utilisé comme matière fissile pour remplacer l'uranium 235.

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

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

7 Uox usés produisent le plutonium nécessaire pour un assemblage MOx

→ On remplage donc 1 assemblage sur 8 !



- On concentre la **radiotoxicité dans les Mox usés** en vue **de valoriser le plutonium** 'plus tard'
- Mais ils deviendraient des déchets si l'on a pas besoin d'économiser l'uranium avec les réacteurs régénérateurs

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

Plan du cours

Ce qu'il faut retenir

- La notion de **déchet nucléaire** est **juridique** et conditionne l'ensemble du débat

- **En France, les combustibles usés ne sont pas des déchets**
  - **A cause de la présence du Pu**
  - **C'est pourtant le Pu qui concentre la quasi-totalité de la problématique**

- Le **recyclage du Pu dans les MOx** ne permet **pas** de **réduire la radio-toxicité** des matières
  - Il permet par contre de **concentrer** le Pu dans un nombre limité d'assemblage
  - Il permet aussi une **économie d'uranium naturel** d'environ 12%

… Le reste après manger …

Energie(s) nucléai[illegible] pour le futur:
Quel apport [illegible] physique nucléaire ?

Partie II

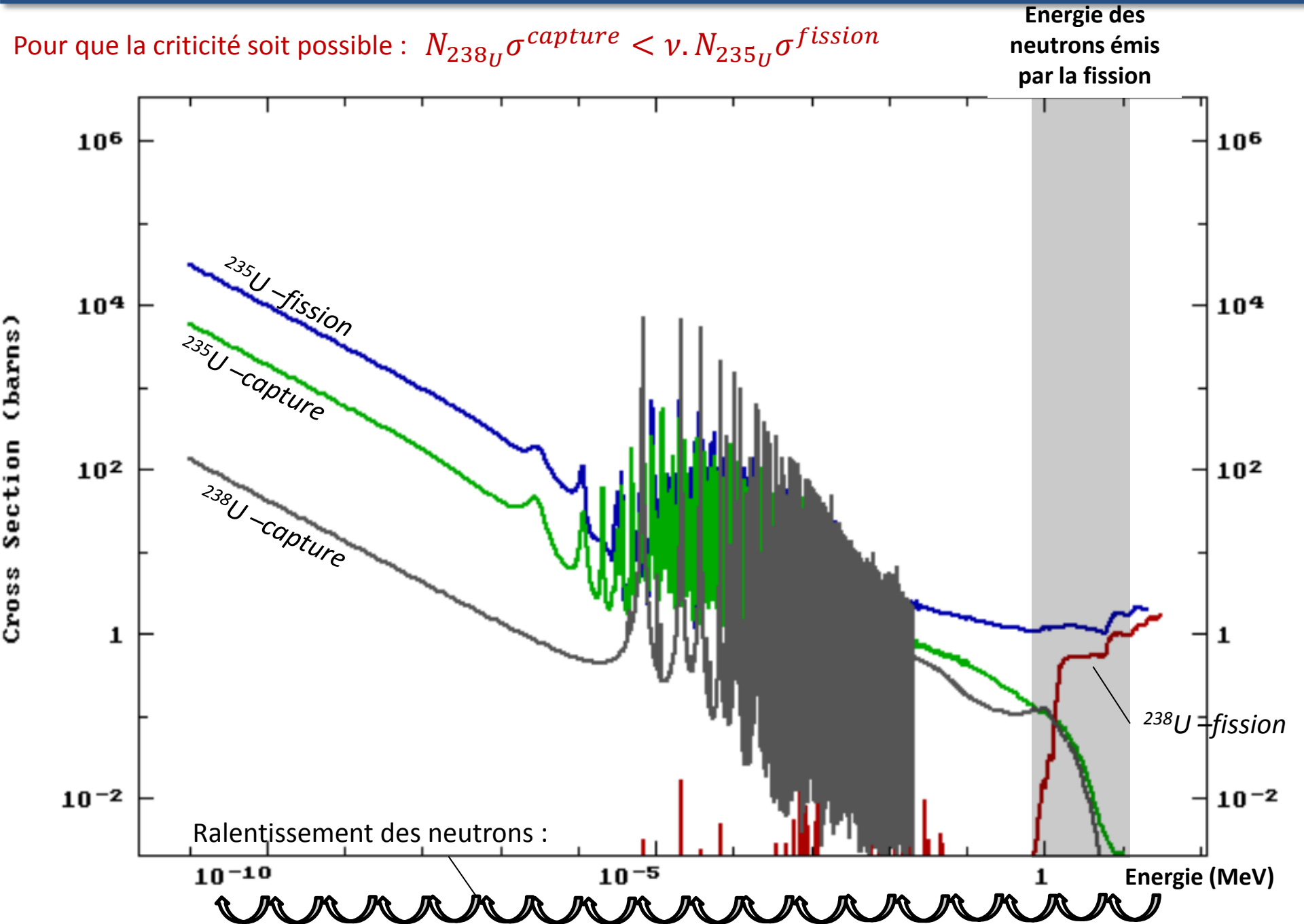
[illegible]otion Chien-Shiung Wu

Rencontre des deux infinis
16 - 27 juillet 2018

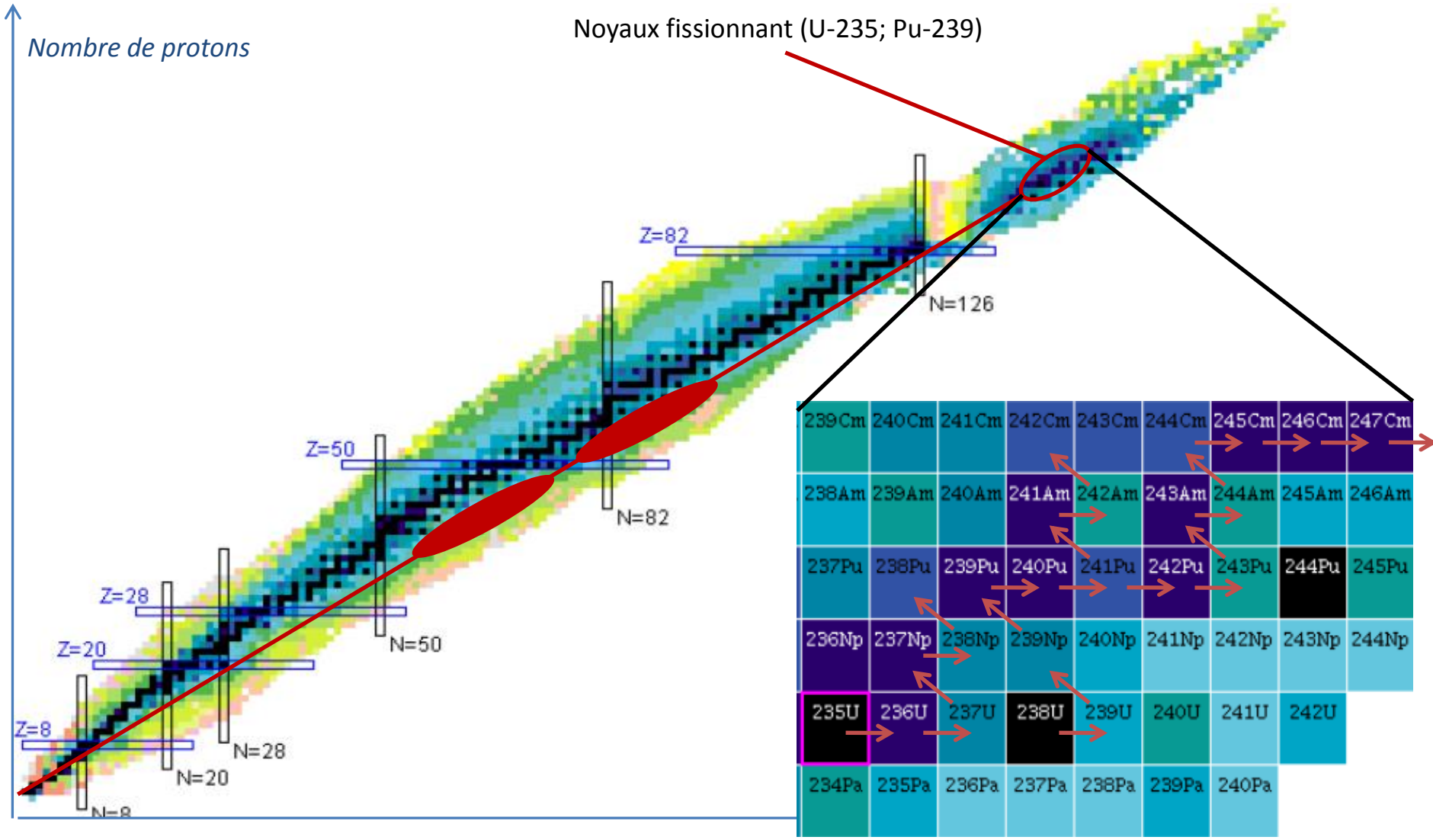
Xavier Doligez
Institut de physique nucléaire d'Orsay
doligez@ipno.in2p3.fr

Quelques rappels importants

Pour que la criticité soit possible : $N_{238_U}\sigma^{capture} < \nu . N_{235_U}\sigma^{fission}$



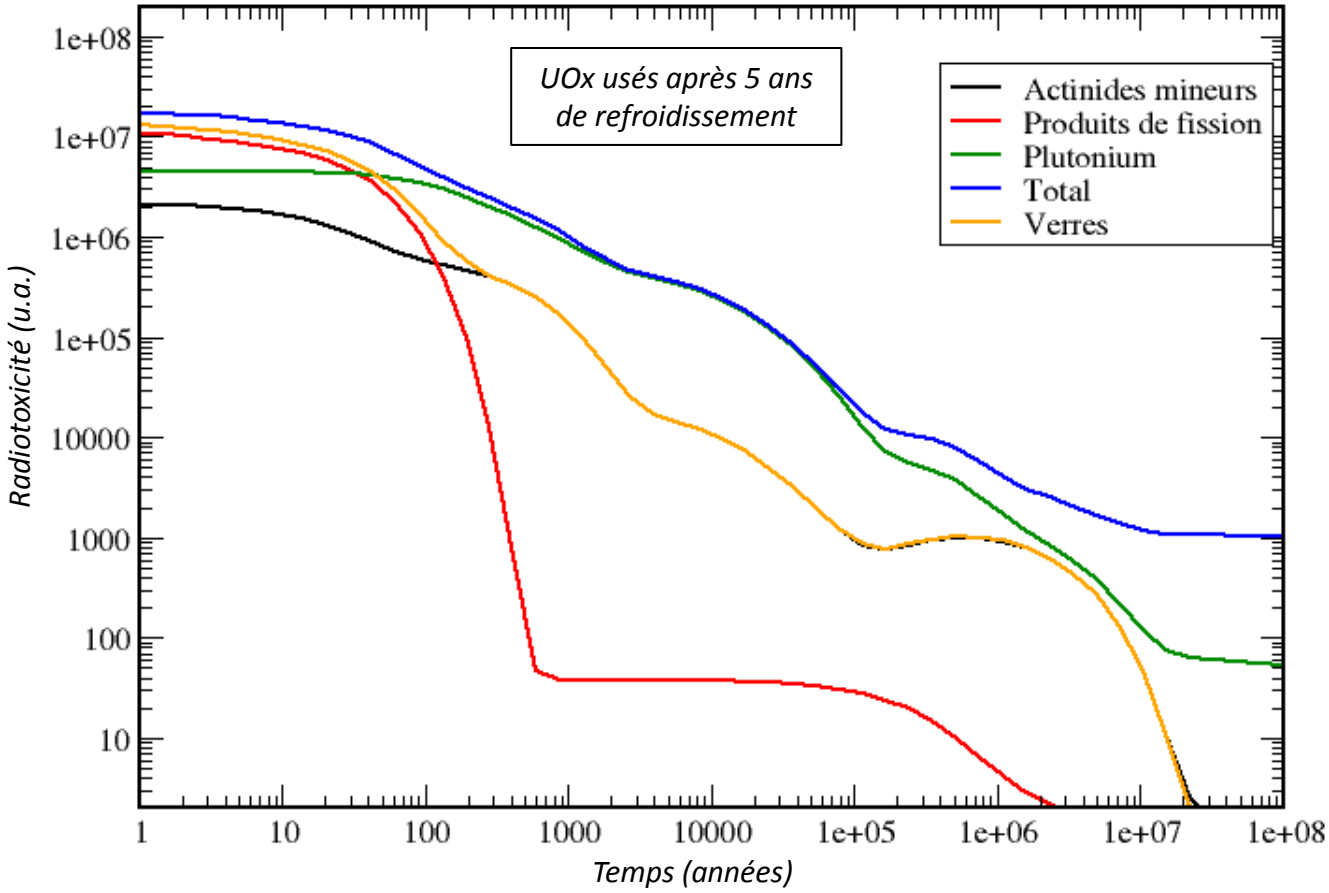
Quelques rappels importants



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)

Quelques rappels importants

- La définition des déchets conditionne le débat
  - *L'essentiel de la radioactivité est contenu dans le plutonium qui n'est pas un déchet !*



- Si le Pu n'est pas un déchet →1 CIGEO
- Si le Pu est un déchet → 10 CIGEO

Considérez vous le Pu comme : déchet principal/matière précieuse

Rayer la mention inutile

Plan du cours

1/Physique nucléaire et physique des réacteurs

2/ Les déchets nucléaires

3/ Les ressources en uranium naturel

- La valorisation du plutonium
- Les réacteurs de la quatrième génération sont-ils indispensables ?

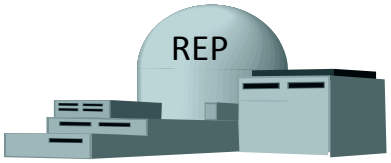
4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

- Qu'est ce que c'est ?
- Un choix pour le futur et donc un non-choix ?

Conclusions

- Des ordres de grandeurs qui compliquent le débat
- Les projets de réacteurs européens
- La place de la physique académique dans le débat

La valorisation du plutonium



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

1 GWe.an

- 1 tonne de matière qui a fissionnée
- 27 tonnes d'uranium enrichi
- 200 tonnes d'uranium naturel

- améliorer le procédé d'enrichissement
- recycler l'uranium
- recycler le plutonium

→ **130 tonnes d'Unat/GWe.an**

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

$^{238}U + n \longrightarrow {}^{239}U \longrightarrow {}^{239}Np \longrightarrow {}^{239}Pu$

Fertile — *Fissile*

→ La masse de plutonium dans le réacteur est constante
→ 1 tonne d'uranium appauvri par GWe.an

$^{232}Th + n \longrightarrow {}^{233}Th \longrightarrow {}^{233}Pa \longrightarrow {}^{233}U$

Fertile — *Fissile*

Cycle thorium

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

La régénération

Bilan neutronique :

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

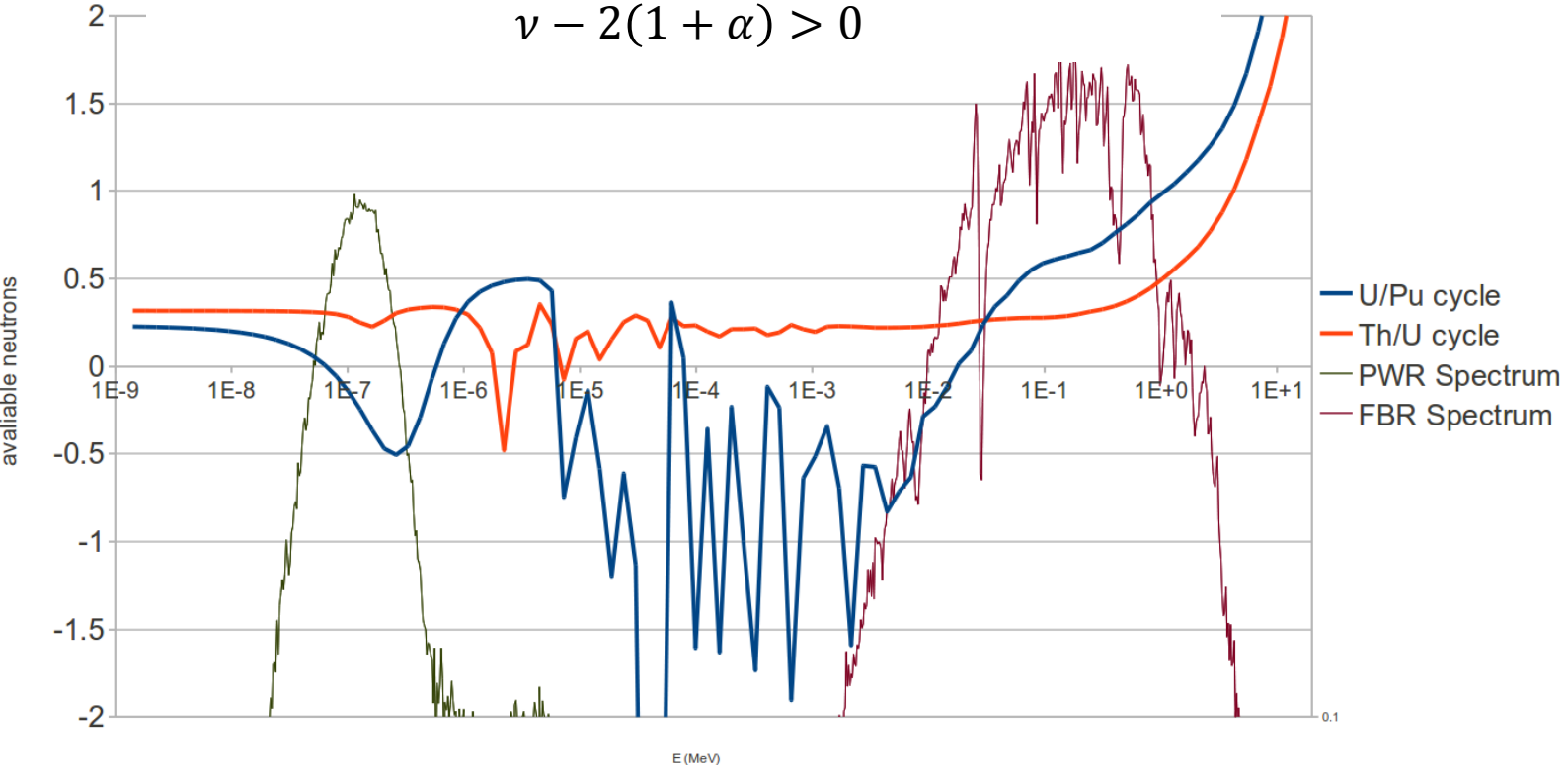
$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$ est le nombre de neutron capturé pour une fission

$1+\alpha$ noyau fissile disparaissent pour la réaction en chaine

Il faut produire $1+\alpha$ noyau fissile

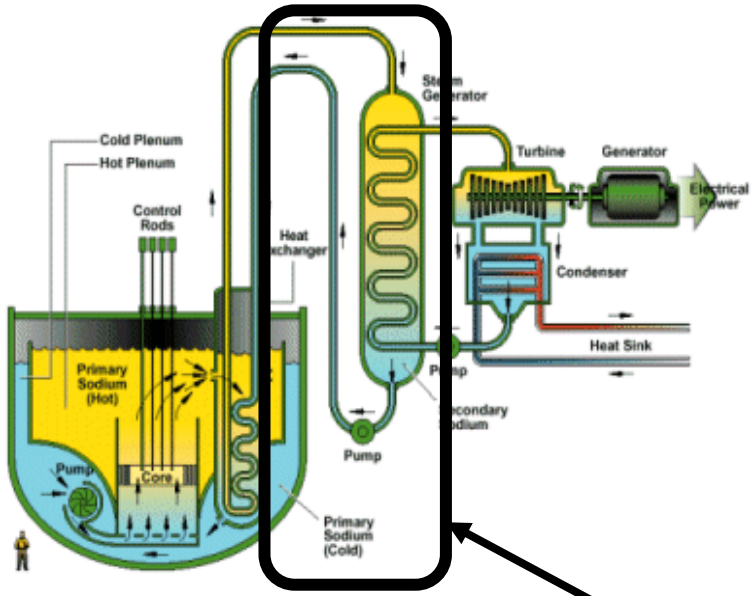
Pour que la régénération soit possible il faut que :

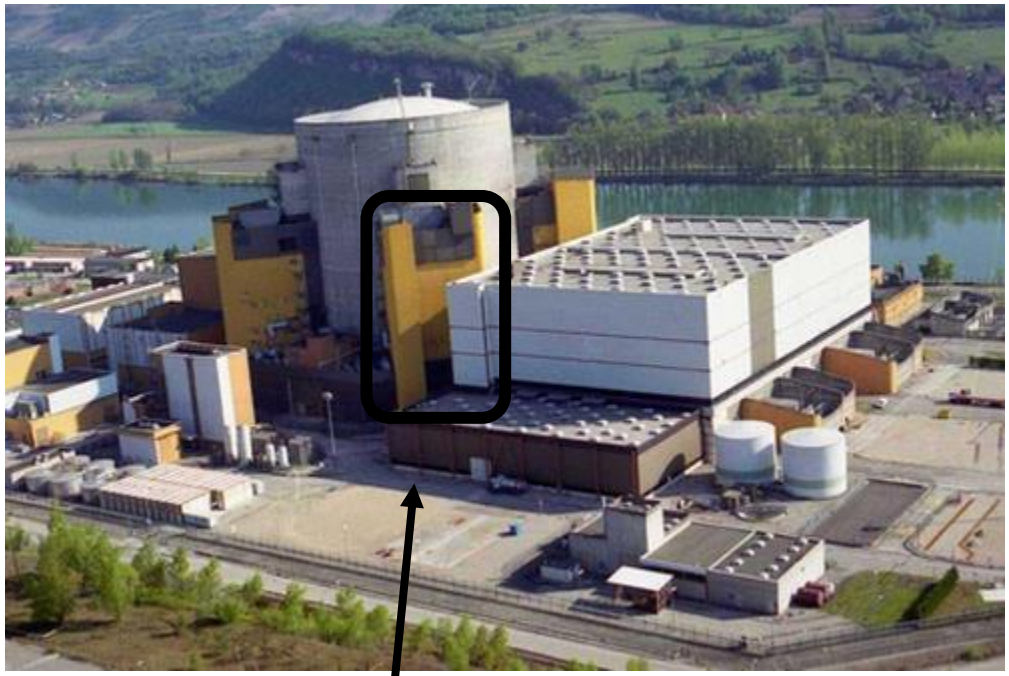
$$\nu - 2(1+\alpha) > 0$$



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

La problématique de l'inventaire initial

$^{238}U + n \rightarrow {}^{239}U \rightarrow {}^{239}Np \rightarrow {}^{239}Pu$

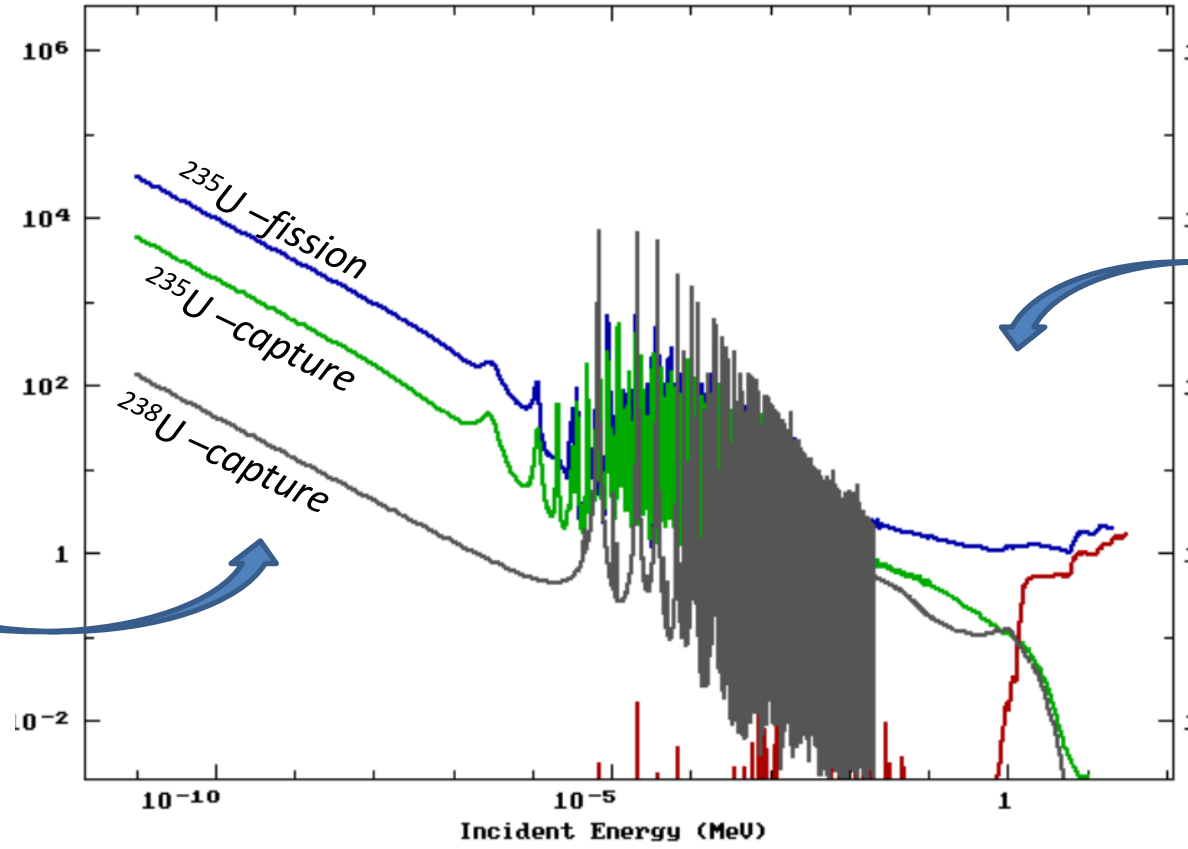
Fertile — *Fissile*

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

→ Ensuite ils ne consomment plus que de l'uranium minerai

en France on a 200 000 t d'Uapp disponible

Les RNR ne valorisent pas l'U-238

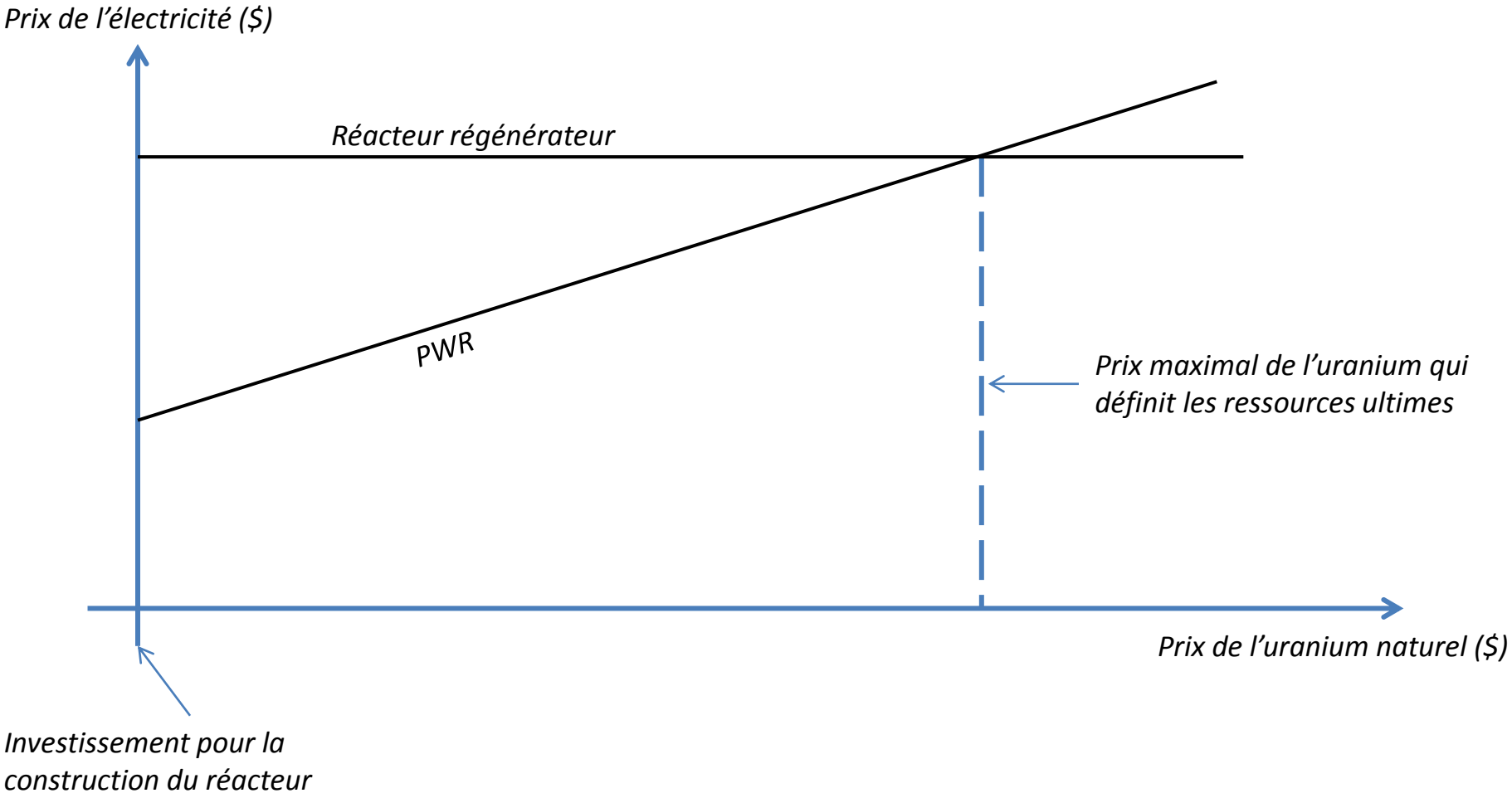


En REP, les sections efficaces imposent un enrichissement de 3 à 4%

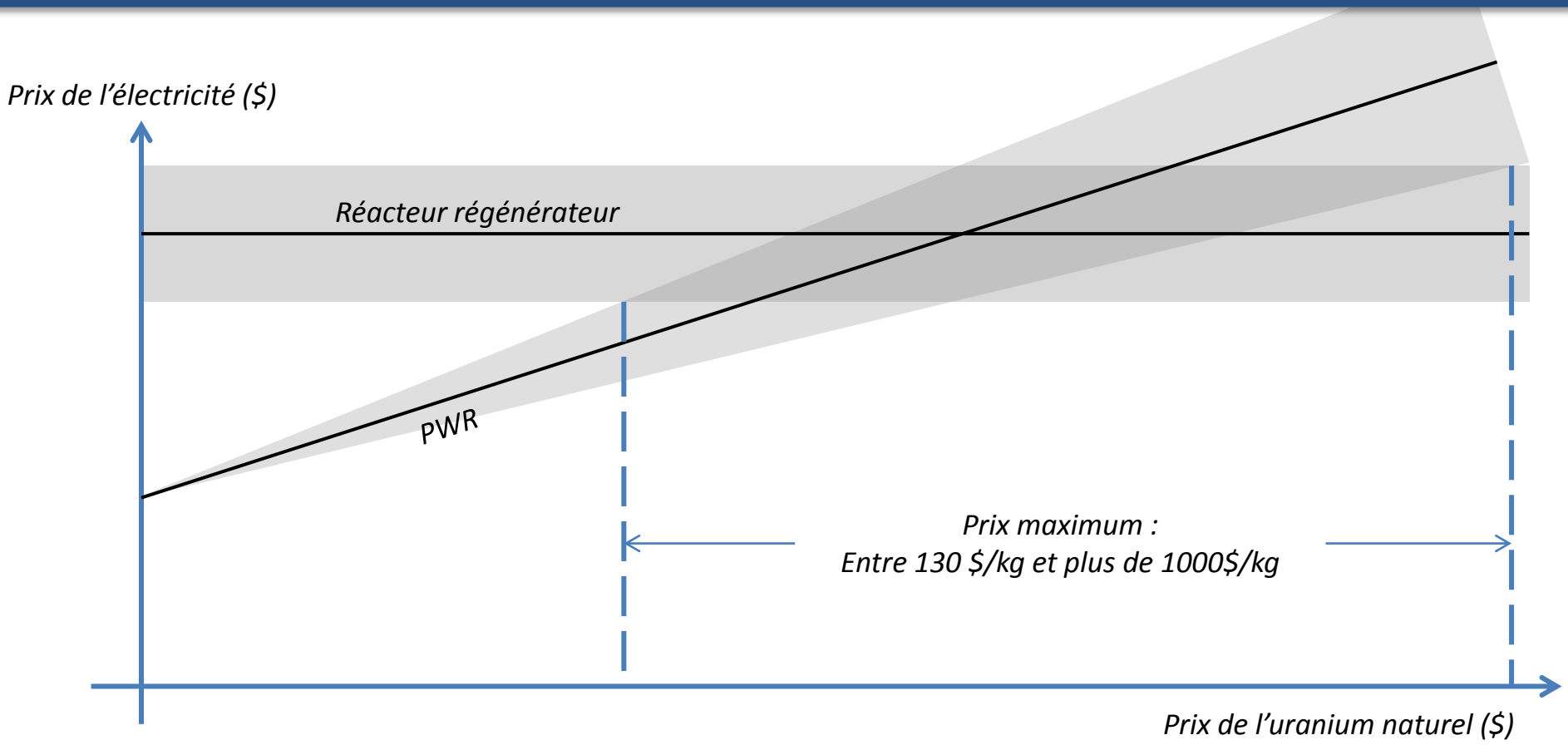
En RNR, on a besoin d'un enrichissement de 10 à 12%

Inventaire initial d'un RNR Sodium ≈ 12 t de Pu ≈ Un REP produit en 50 ans

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

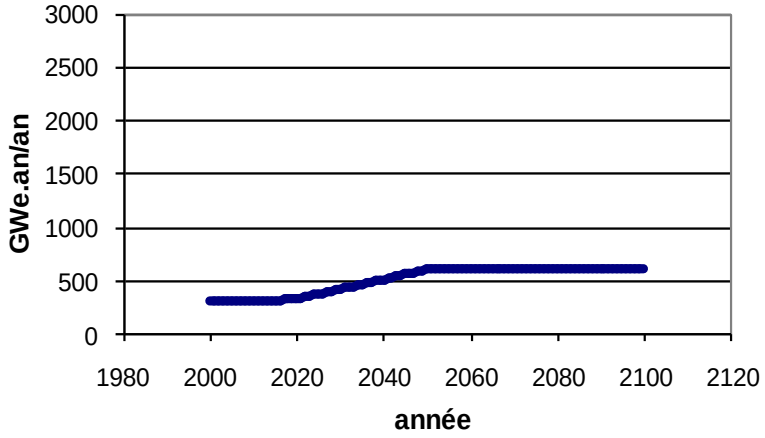
Les ressources estimées se situent entre 10 – 23 millions de tonnes

Ressources d'uranium contre demande nucléaire

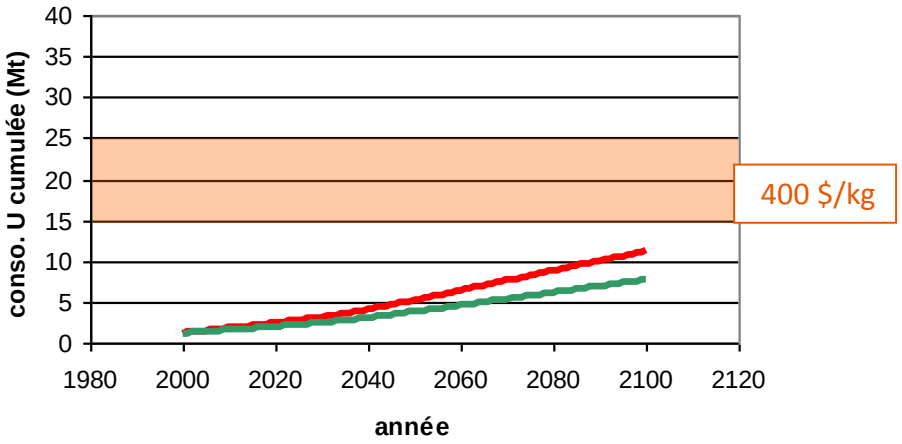
	millions of tons
Réserves prouvées	
< 80$/kg	2.5
< 130$/kg	4.4
Ressources ultimes estimées	
AIEA	16
Extrapolation linéaire « reserves vs. prix » à 400$/kg (ref JF. Luciani, CEA)	23

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

Demande nucléaire



Utilisation cumulé des ressources



La nécessité de voir en amont

Inventaire initial d'un RNR Sodium ≈ 12 t de Pu ≈ Un REP produit en 50 ans

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

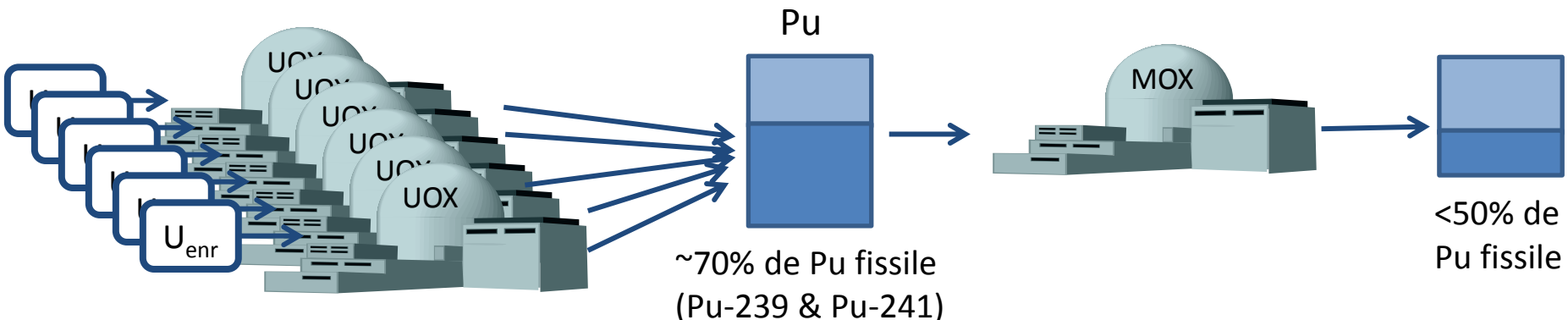
Si on a besoin rapidement des RNR (avant 2100), il faut économiser le plutonium

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

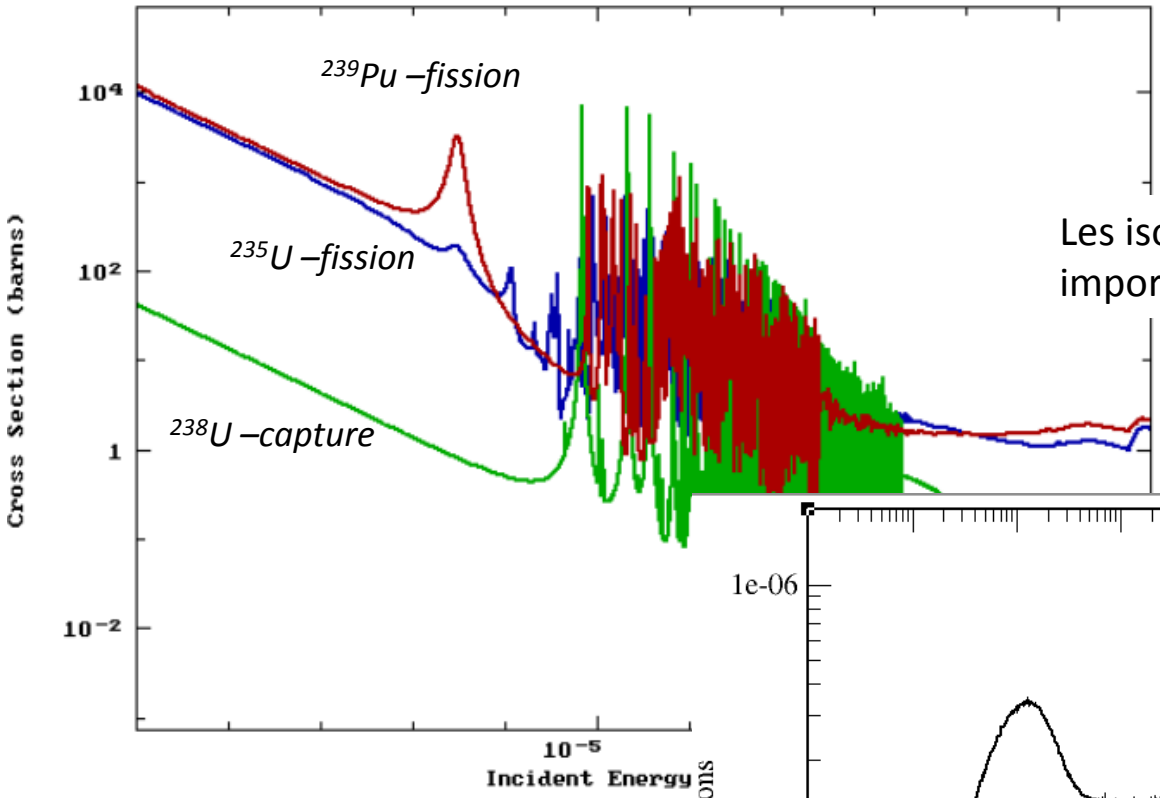
Le recyclage permet de concentrer le Pu dans les Mox usés, en vue de faciliter le recyclage plus tard

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

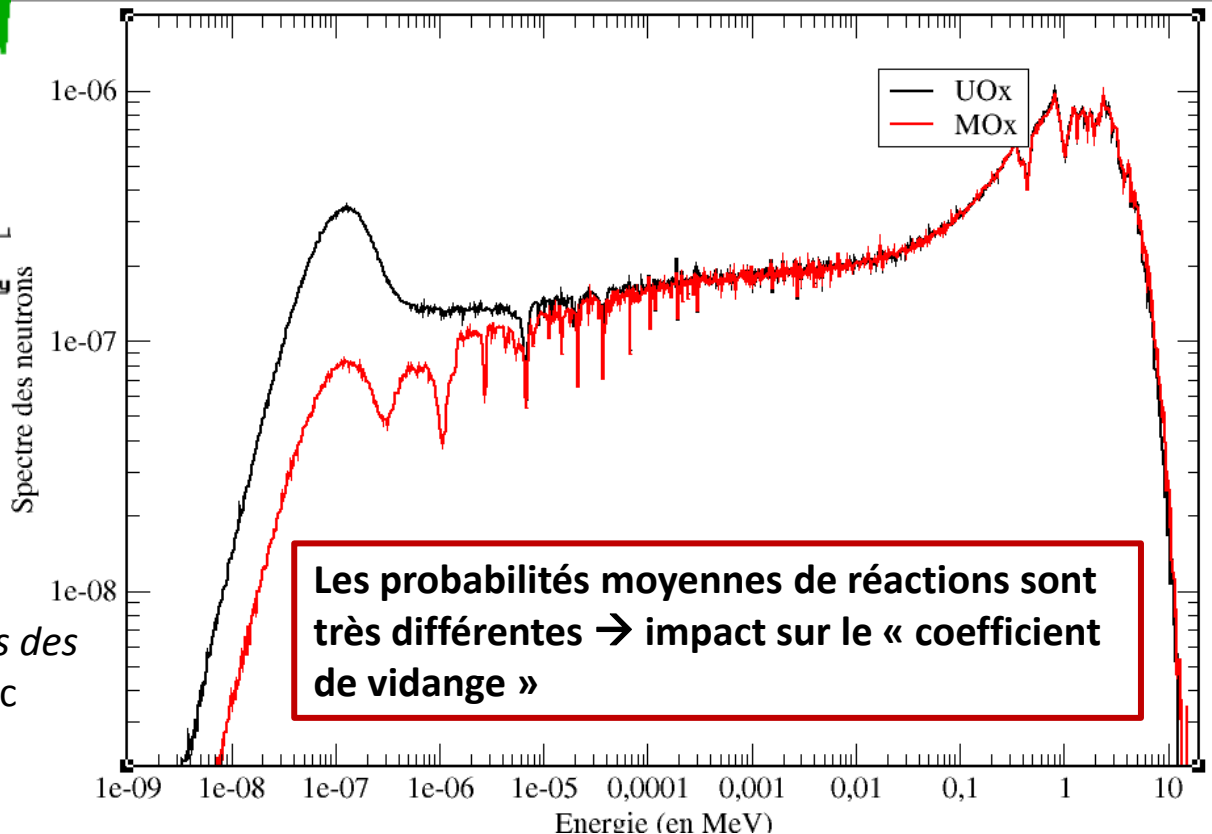
→ *Maintien des compétences industrielles*



L'impact du MOX dans les REP



Les isotopes du plutonium ont des résonnances importantes et creusent le spectre neutronique



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

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

Plan de la présentation

Ce qu'il faut retenir

- Le **plutonium** est une matière **valorisable** dans les réacteurs à neutrons rapides **(RNR)**
  - La régénération permet de **fonctionner « indéfiniment »**

- Si **l'augmentation** du nucléaire est limité à un **facteur 2**, il ne devrait pas y avoir **de tension sur les ressources avant 2100**

- La **tension** devrait porter sur **les débits d'extraction** plutôt que sur les quantités d'uranium elle-même
  - Intérêt des parcs symbiotiques

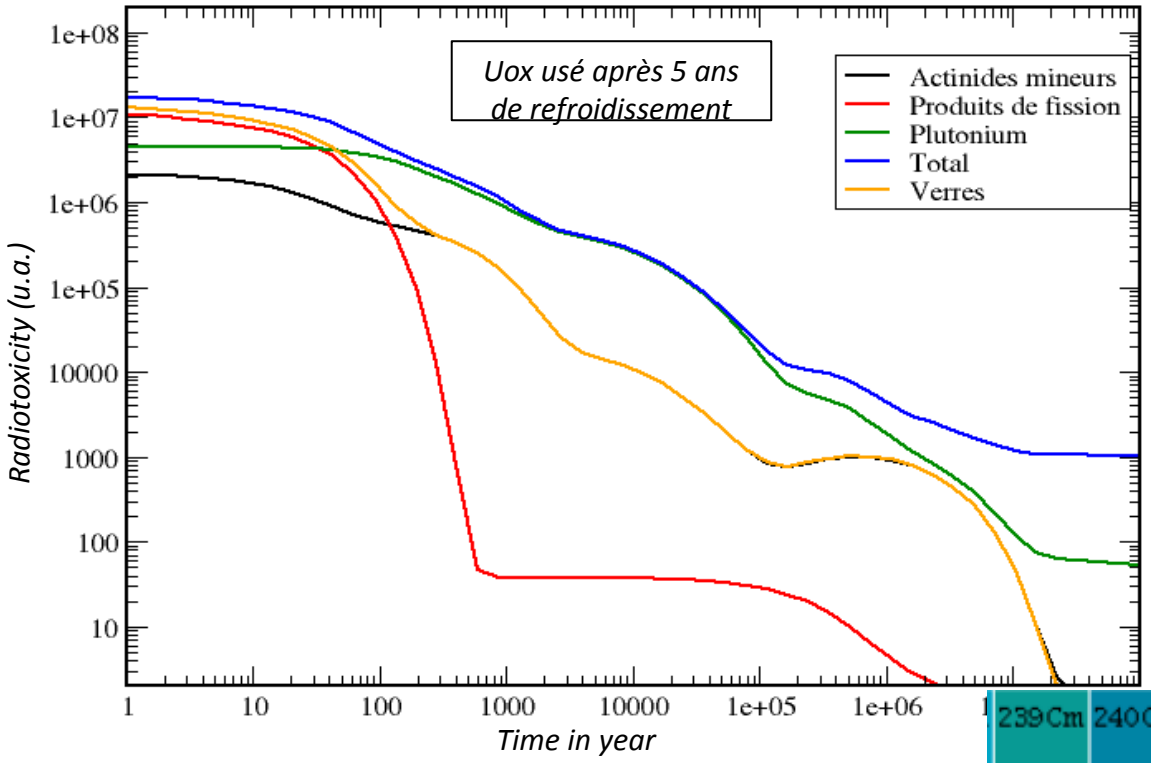
- Les stratégies **d'incinération et d'économie** du plutonium sont très **différentes**
  - Le multirecyclage du Pu en REP est très pénalisant pour la qualité du plutonium

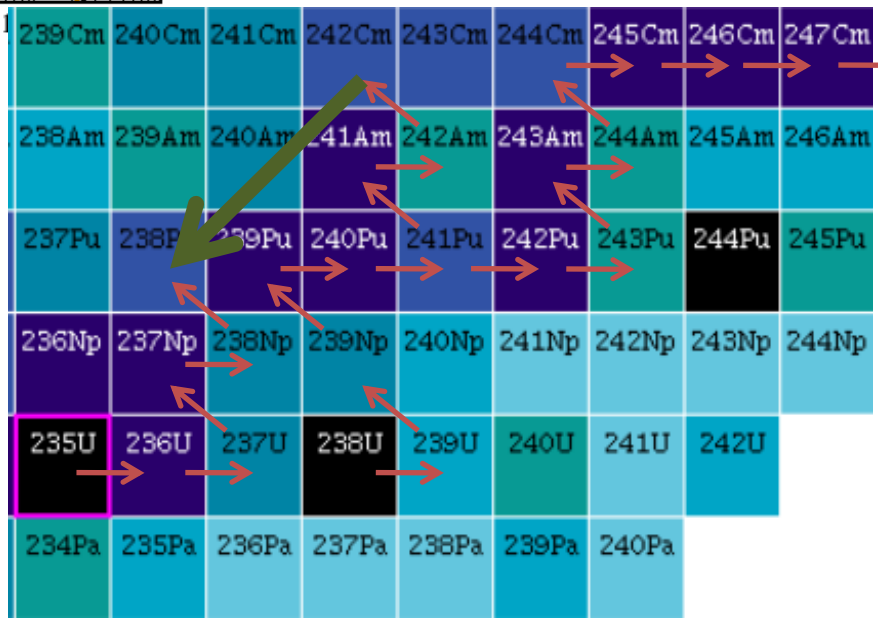
1/ Physique nucléaire et physique des réacteurs
2/ Les déchets nucléaires
3/ Les ressources en uranium naturel

4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation
Qu'est ce que c'est ?
Un choix pour le futur et donc un non-choix ?

Conclusions

La transmutation : qu'est ce que c'est ?

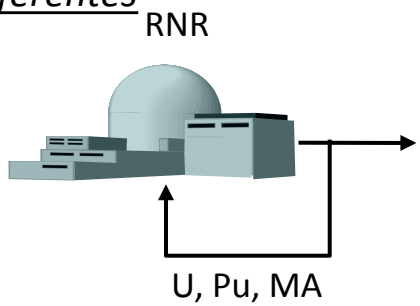




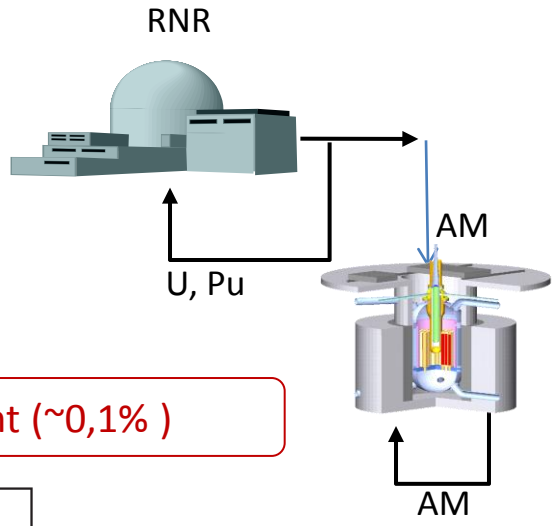
Transmutation des actinides mineurs

Deux stratégies différentes

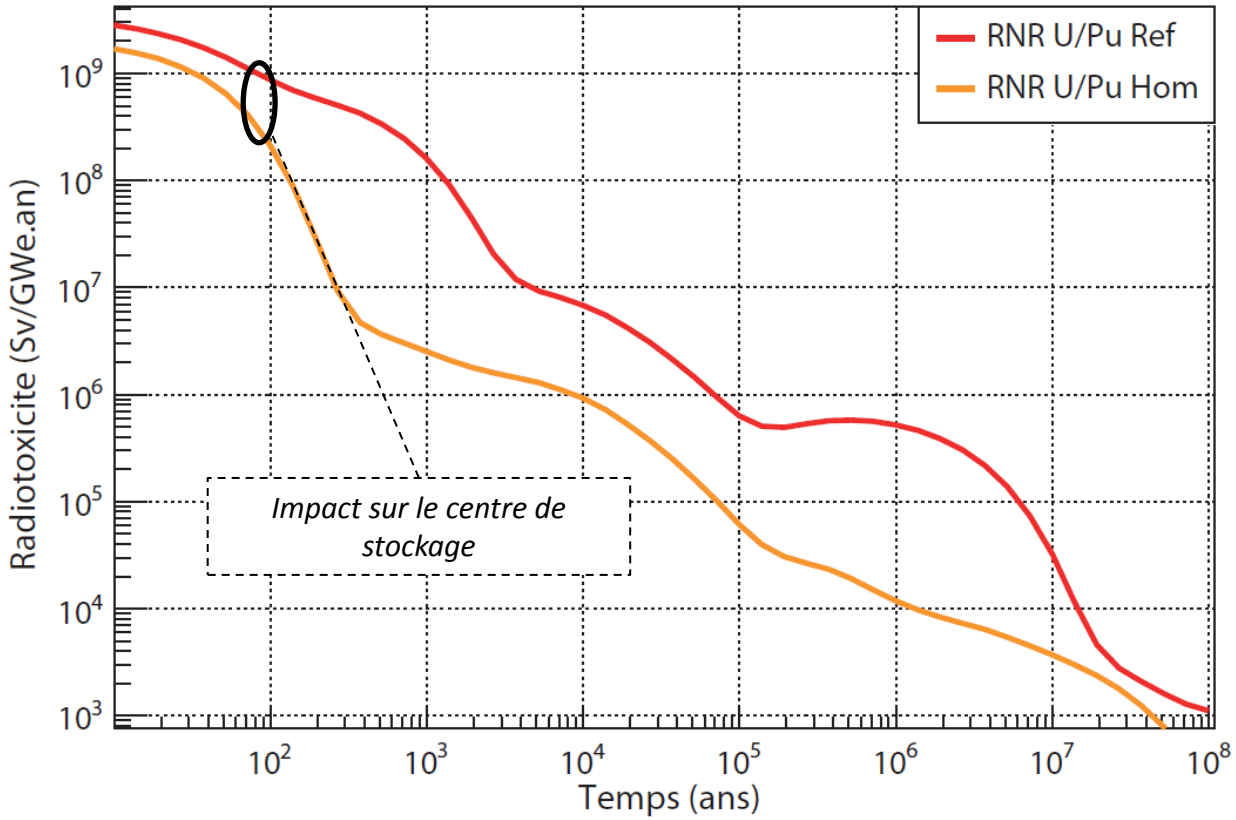
- Dans RNR



- ADS → scénario double strate

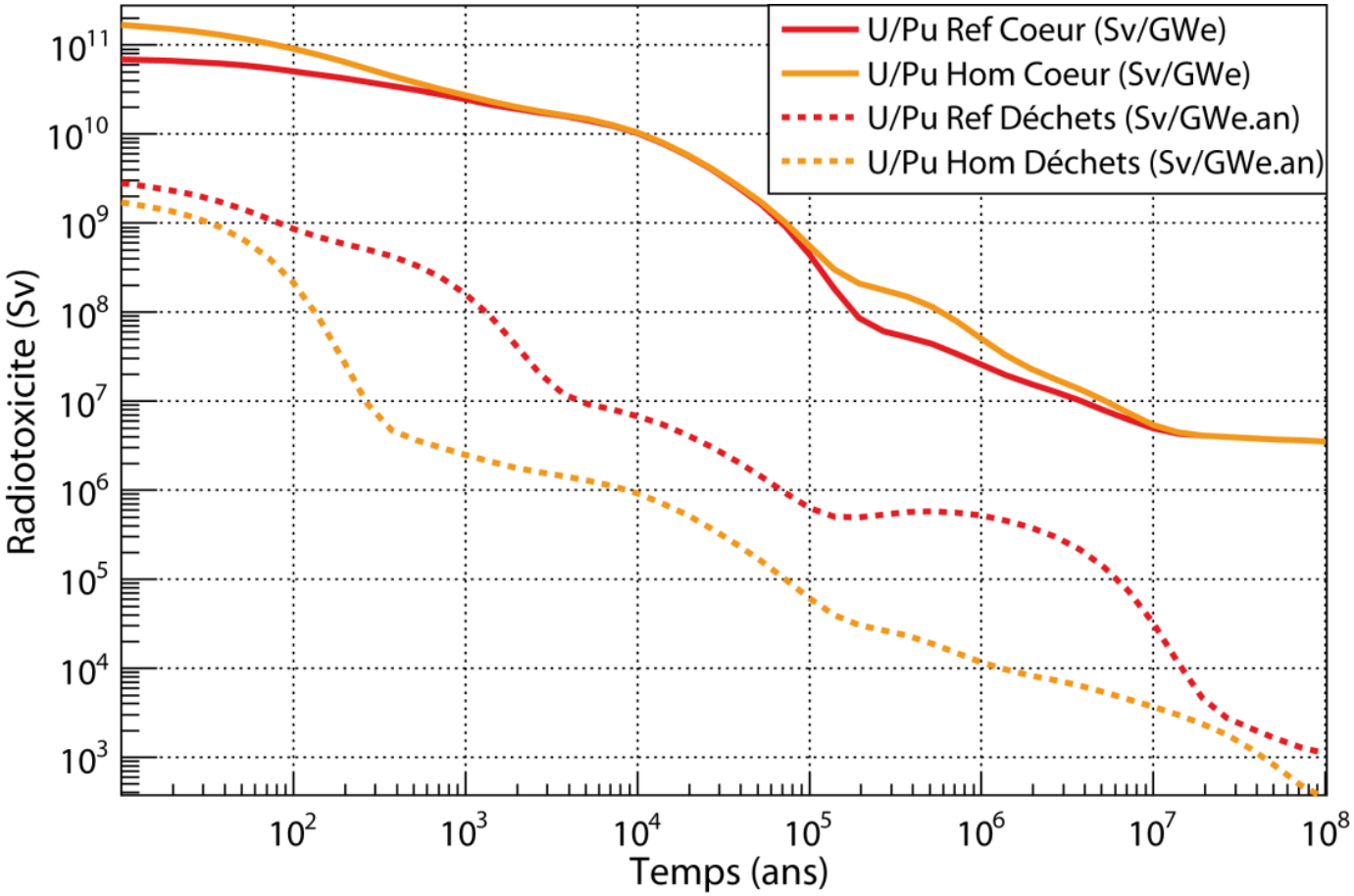


Déchets⇔PF + pertes chimiques au retraitement (~0,1%)



- Comparaison des déchets produits dans un RNR avec (jaune) et sans transmutation (rouge)
- Pour avoir un gain réel sur le stockage, il faut entreposer plus longtemps.
- On gagne un facteur 5 sur l'emprise du stockage si on entrepose 50 ans supplémentaire

L'arbre qui cache la forêt ?



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

→ Il faut 1000 ans de fonctionnement pour produire une radiotoxicité équivalente à celle qui est contenu dans le cœur

→ Les stratégies de « fin de jeu » peuvent conditionner les choix technologiques futurs !

Le paradoxe du nucléaire

- L'apport est limité : on **gagne un facteur 5** sur **l'emprise du stockage HA-VL**, moyennant un entreposage de 50 ans supplémentaire
- On pourrait aller (bcp) plus loin en séparant les Césiums et Strontium (30 ans de période)
  - → Possible redéfinition du cahier des charges de la gestion de l'aval du cycle en l'associant à l'entreposage

cndp
Commission particulière du débat public Gestion des déchets radioactifs

Compte-rendu
du débat public sur les options générales en matière de gestion des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue.
septembre 2005 - janvier 2006

« Utiliser le temps pour construire une solution progressive »

- C'est la solution réversible par excellence alors que le **stockage** est destiné *in-fine* à être **irréversible**
  L'entreposage bénéficie des progrès à faire
- Mais **l'entreposage** est perçue comme une **non-décision** qui engagerait la **responsabilité des générations futures**

Une position difficile à comprendre :

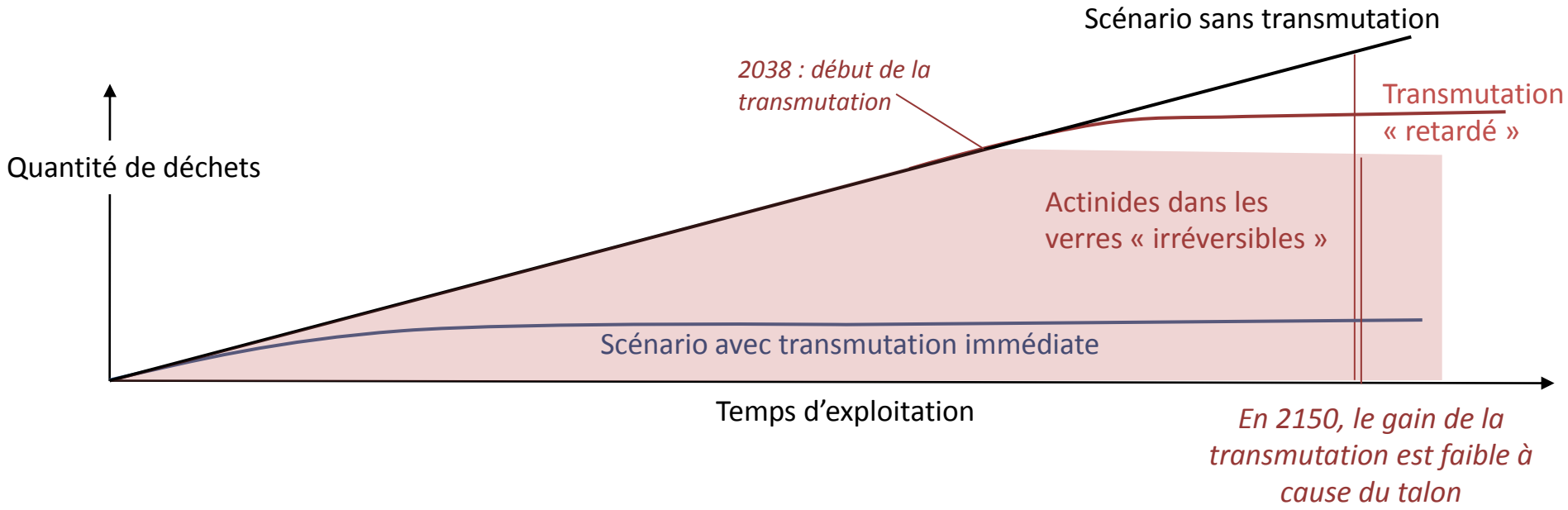
	Confiance dans la société	Oui	Non
Promoteur-nucléaire	Pour un développement durable du nucléaire	X	
	Pour la transmutation		X
« Anti-nucléaire »	Pour un développement durable du nucléaire		X
	Pour la transmutation et/ou entroposage	X	

En attendant, on vitrifie

La transmutation : un choix futur et donc un non-choix ?

$$\frac{dN}{dt} = \text{Production} - \underbrace{Disparition}_{\text{Apport de la transmutation}} \rightarrow N(t) = \frac{P}{\sigma_a \phi}(1 - e^{-\sigma_a \phi t})$$

L'équilibre est donnée par le taux de disparition (donc le flux de neutrons et donc la puissance)



- Les stratégies de **transmutation** s'engagent sur **de longues décennies** (On gagne un facteur 5 au bout de 150 ans)
- Pour les **PF-VL**, l'incinération **est peu efficace** (matériaux, temps d'irradiation, impact fort dans le cycle)
- Le « **talon** irréversible » **décrédibilise** la mise en œuvre de la **transmutation**
- Peut-on remettre en cause l'irréversibilité des verres?

Plan de la présentation

Ce qu'il faut retenir

- Il est possible de transmuter les actinides mineurs
  - La transmutation est une option à long terme qui suppose une gestion du plutonium
  - C'est donc une stratégie long terme (pro-nucléaire)

- L'inventaire dans le parc atteint donc un équilibre
  - La radiotoxicité contenu dans le parc est considérable par rapport aux déchets produits avec ou sans transmutation

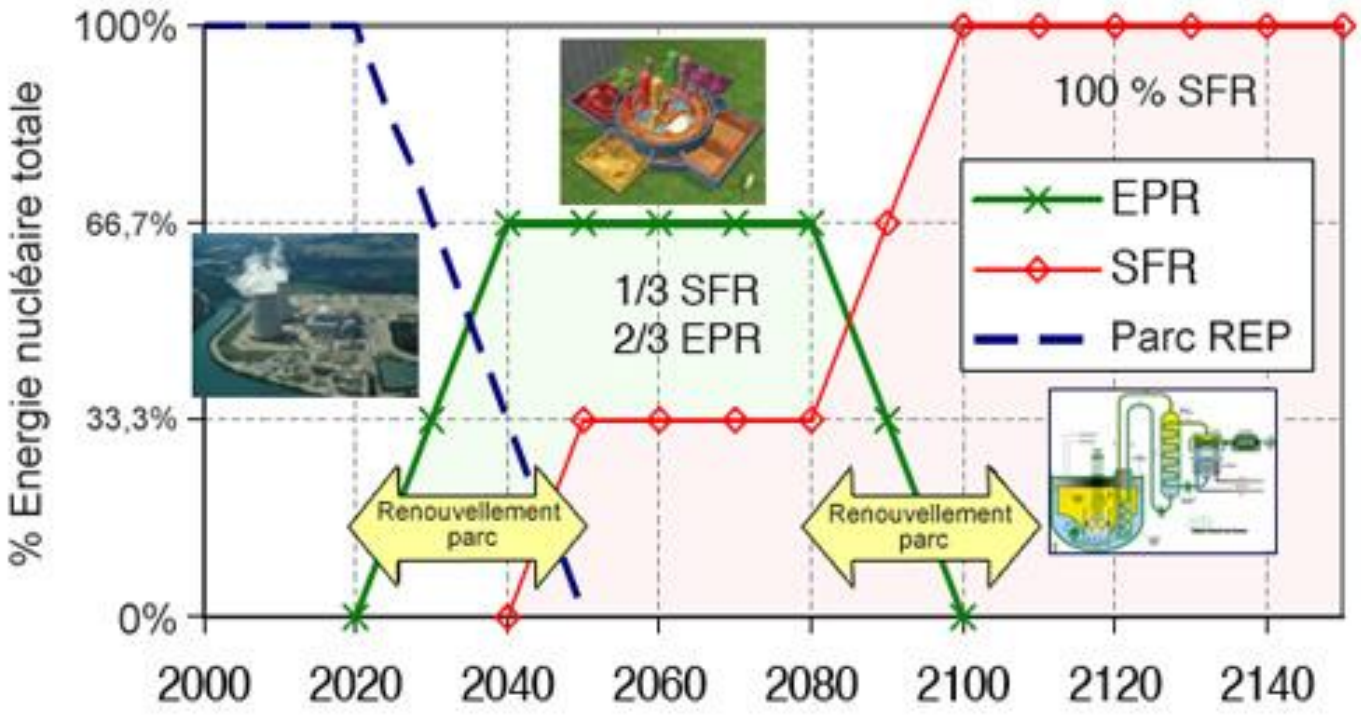
1/ Les ordres de grandeurs qui font mal
2/ Les déchets nucléaires
3/ Les ressources en uranium naturel
4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

5/ Conclusions : quel nucléaire pour quel futur ?

L'importance des scénarios pour les décisions
Les projets de réacteurs européens
Une problématique qui dépend de la futur demande

Comment faire un choix objectif ?

- **Stratégie française « de référence » :**



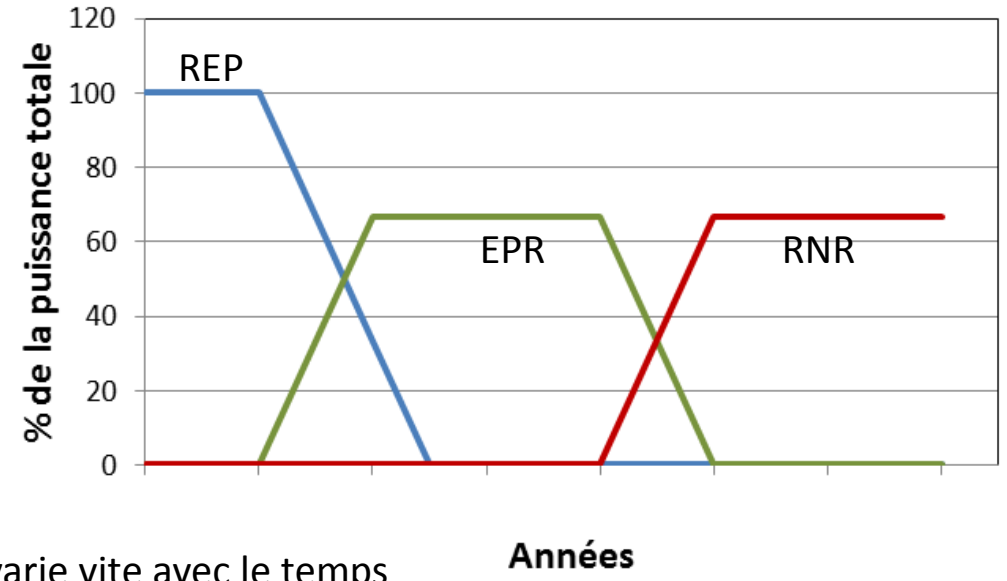
- **Variantes :**
  - Date de déploiement des RNR
  - Transfert du plutonium aux frontières
  - Mises en place de la transmutation
- **Cycle du thorium**
- **Réacteurs alternatifs (CANDU, RSF)**

- **Différents critères de comparaison**
  - → *Production de déchets*
  - → *Consommation de la ressource naturelle*
  - → *Coefficients de sûreté de base*
  - → *Inventaire en cycle*
  - → *Résistance à la prolifération*
  - → *…*

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%				244Np 2.29 M β-: 100.00%
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%	β-	16.8 M β-: 100.00%	243U

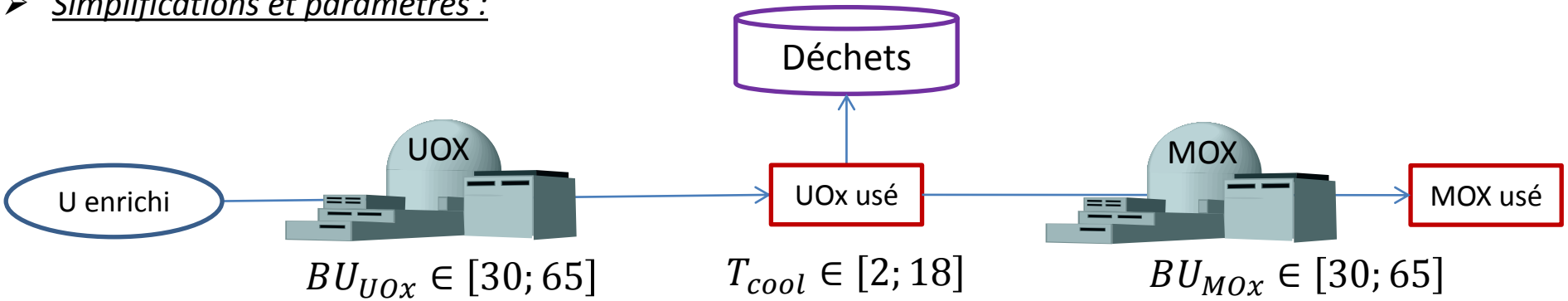
241Pu			
E(level)	Jπ	$T_{1/2}$	Decay Modes
0.0	5/2+	14.325 y 6	β⁻ : 100.00 % α : 2.5E-3 % SF < 2E-14 %

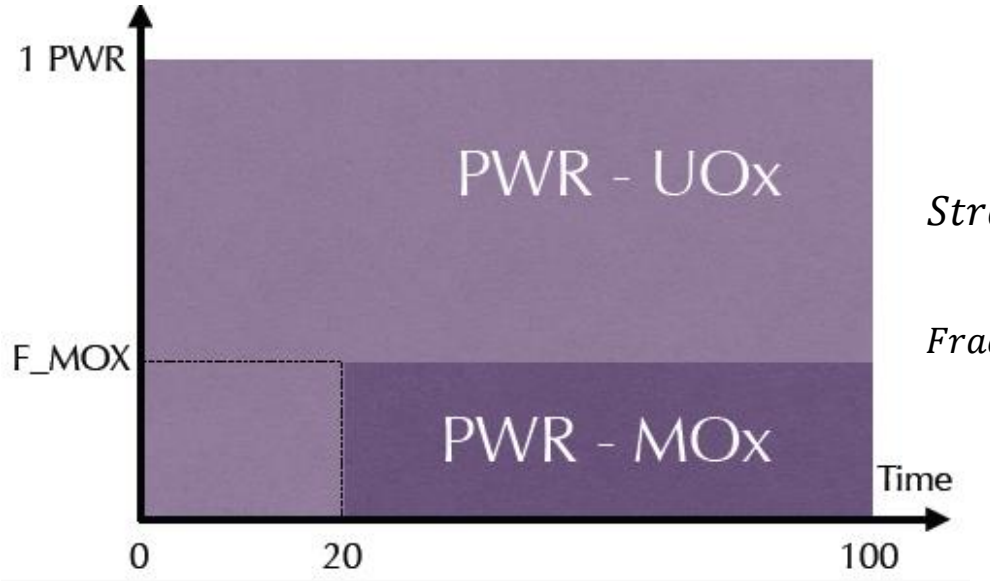
Besoin de stratégies *« flexibles » :*

- **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 :*





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

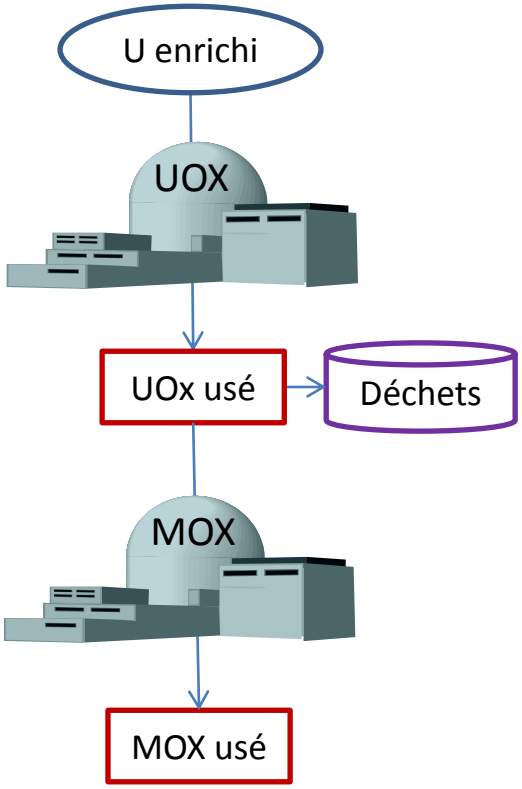
$$Fraction\ MOx \in [0\%; 20\%]$$

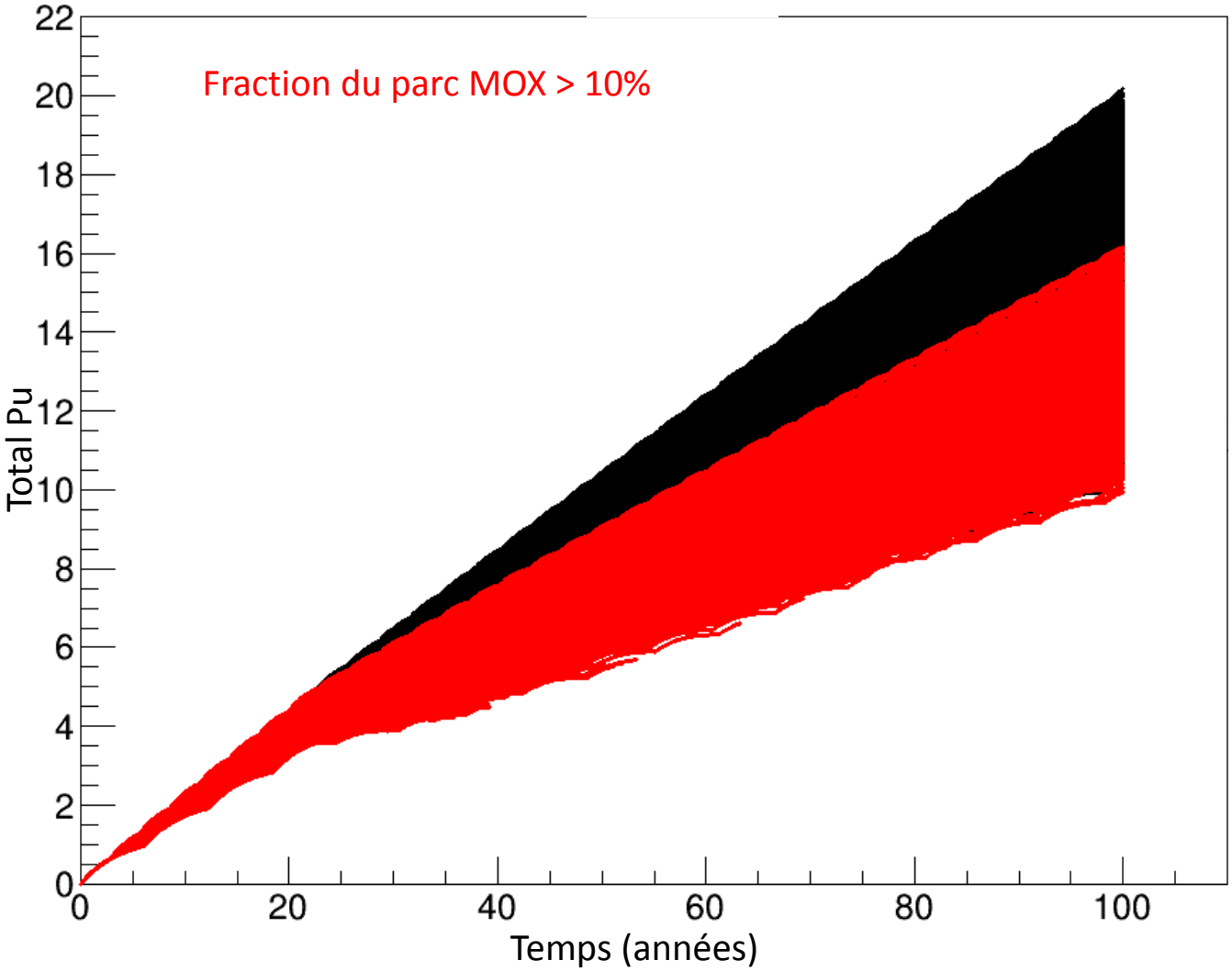
➢ *Echantillonnage et réalisation de N calculs*
(N ~ 10 000)

➢ *Observables*
- Inventaire plutonium total en cycle
- Production d' actinides mineurs
- Consommation d'uranium naturel

Production de Pu

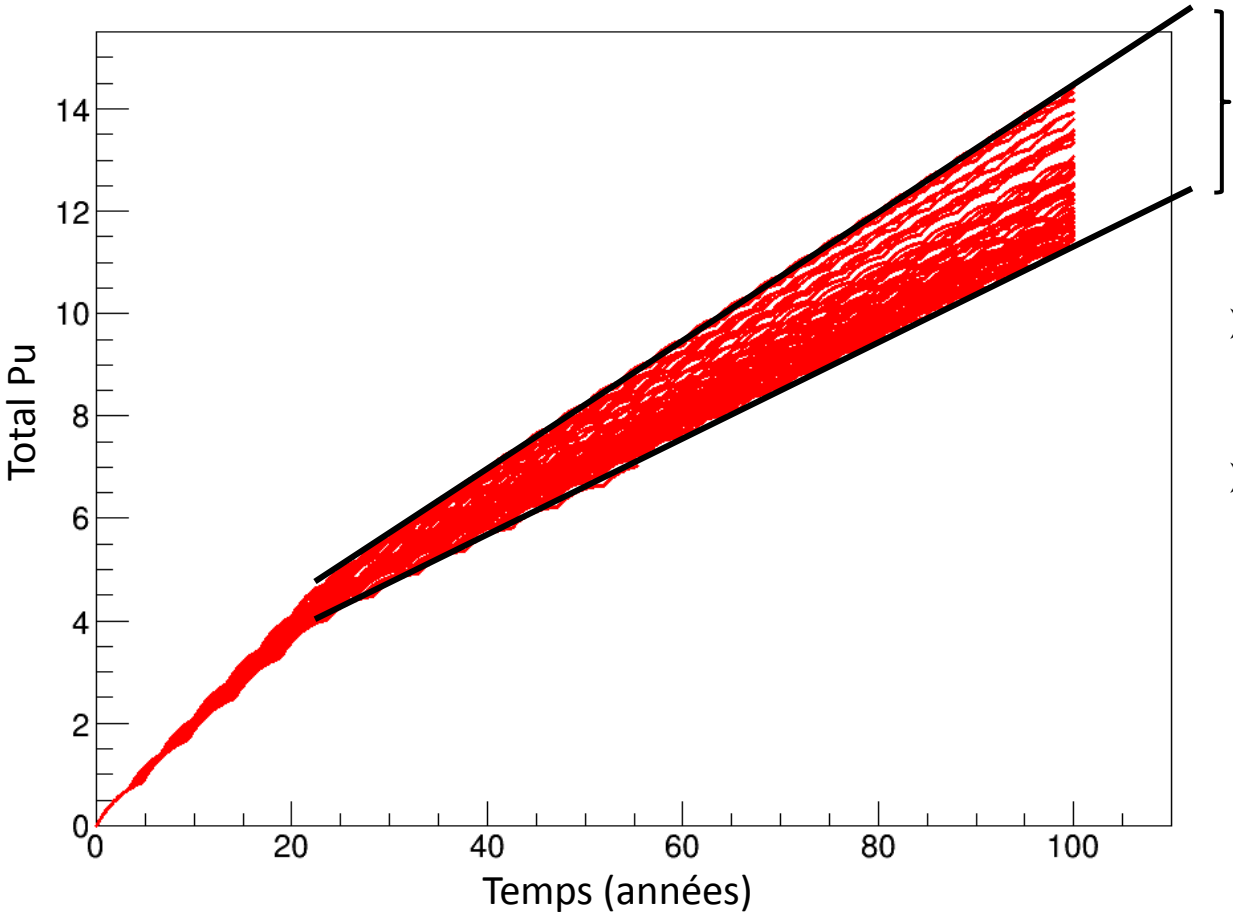
- Ensemble des évolution du plutonium en fonction du temps





Production de Pu : application au parc Français

- *Les contraintes sur le parc Français :*
  - Une fraction de Mox comprise entre 10 et 12% (fixée)
  - Des BU compris entre 35 et 45 GWj/t
  - La parité MOX (BU UOX = BU MOX)



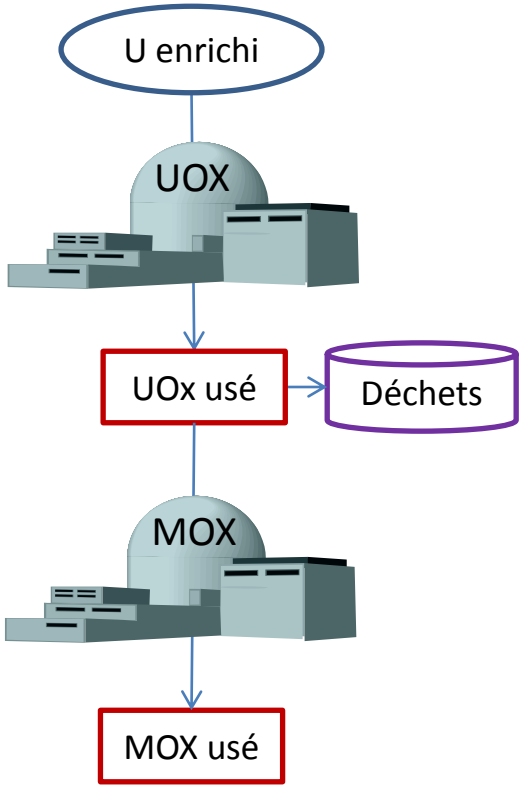
Variation de pente :
28 %

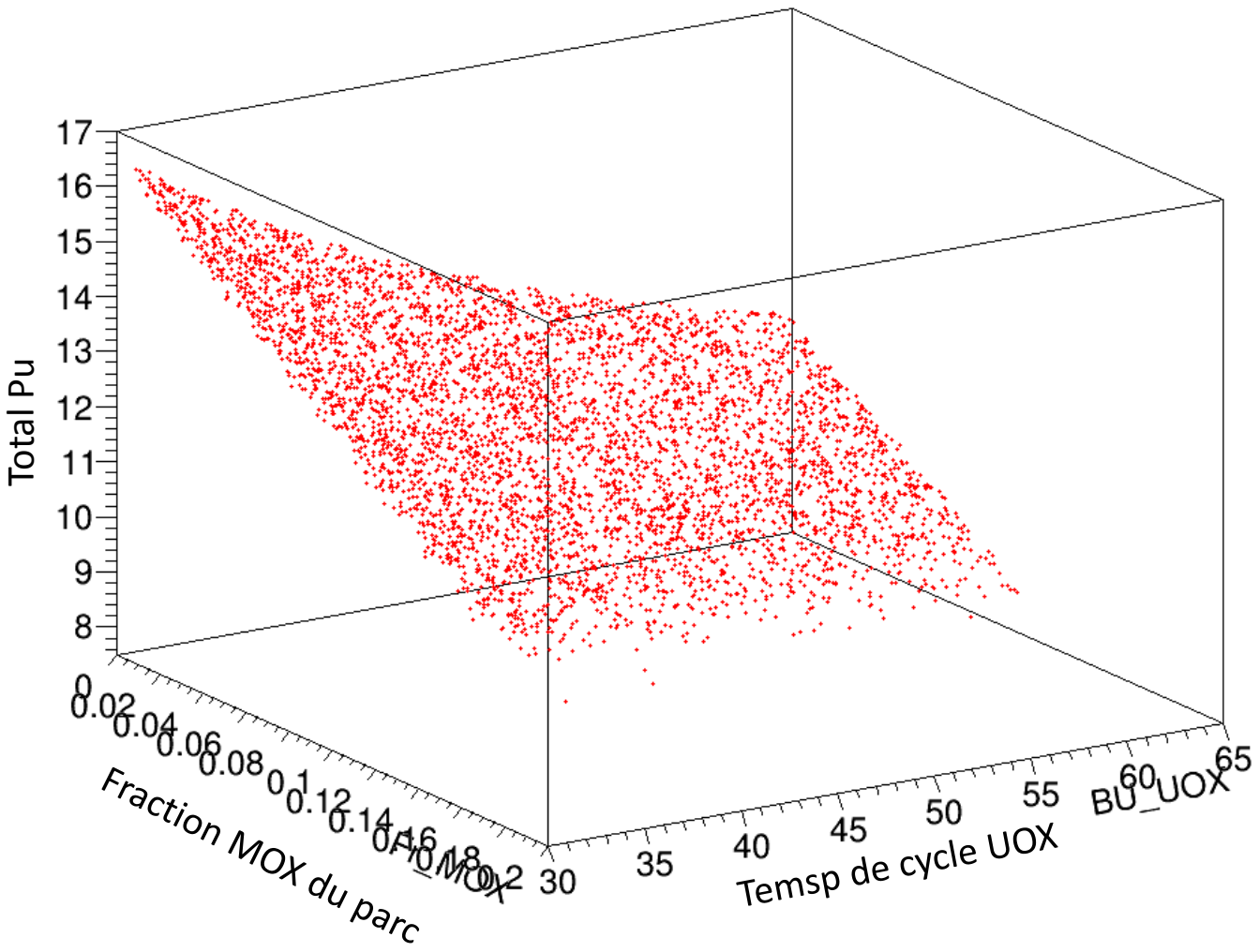
- Pour un parc 100% RNR il faut 1500 tonnes de plutonium
- Au rythme actuel de ~10 t/ans, un parc 100% RNR (à puissance constante) sera possible en 2150 !

Production de Pu

➢ A un instant donné, on caractérise la quantité de Pu dans le parc avec 2 variables uniquement

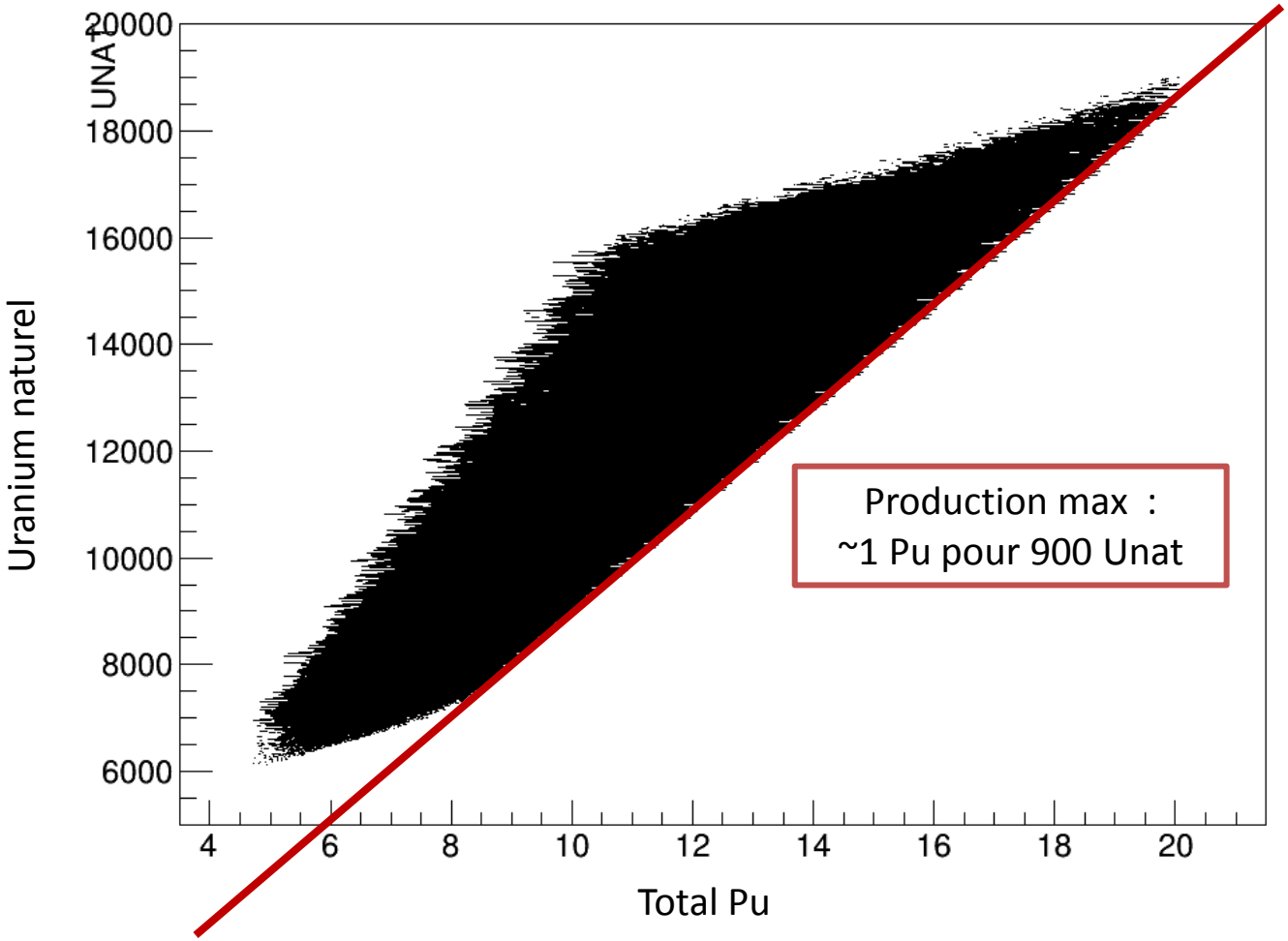
Ex : après 80 ans de fonctionnement





Production de Pu

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

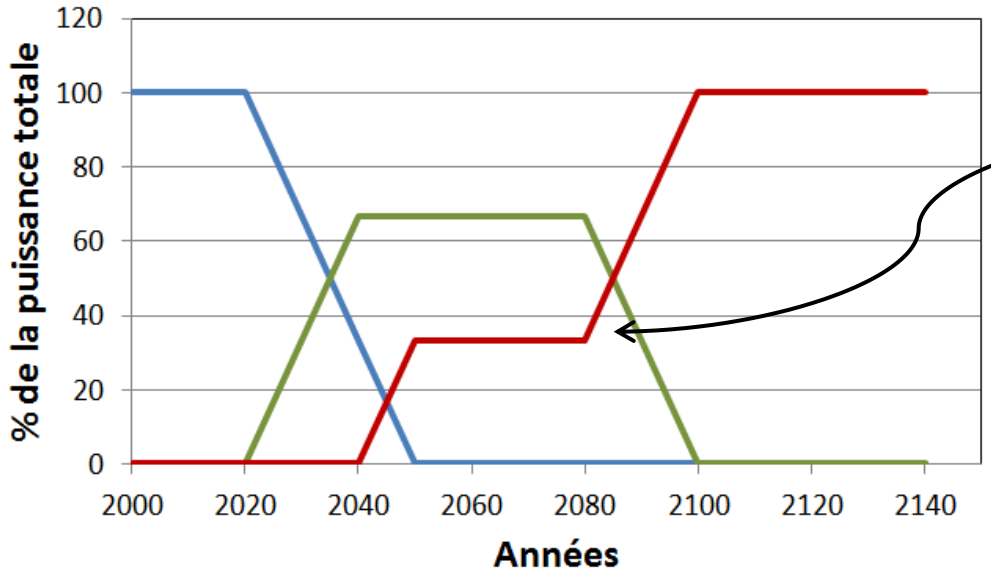


- Rappels :
  - 1 RNR = 15 à 20 tonnes de Pu
  - ~ 10^7 tonnes d'uranium naturel disponible

→ Entre 500 et 700 RNR possibles

Optimisation des RNR, surgénération et systèmes innovants pour un déploiement au niveau mondial

Retour sur le scénario de référence



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

↓

« Tendu 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 en augmentant la fraction MOX et le BU des UOX*

- 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*

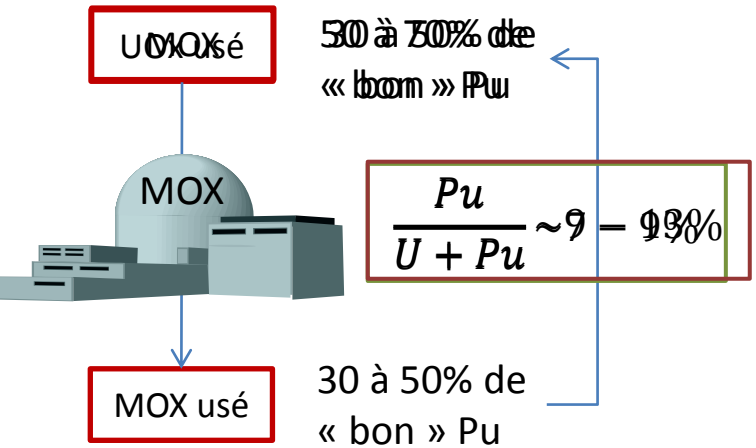
Stratégie Française : stratégie flexible qui permet le choix passé 2050 !

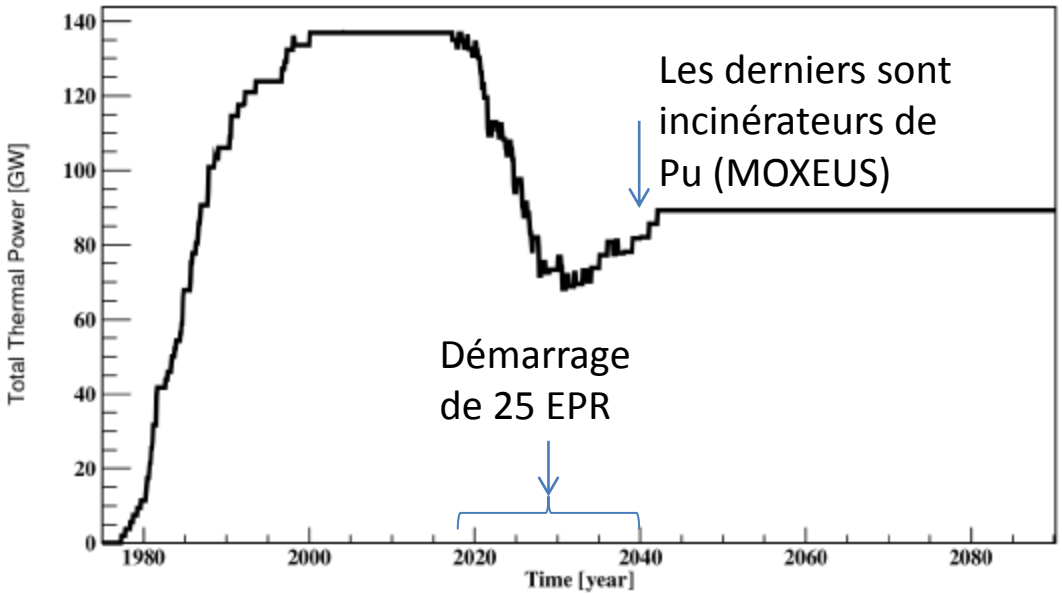
Une stratégie d'attente ? Jusqu'à quand ?

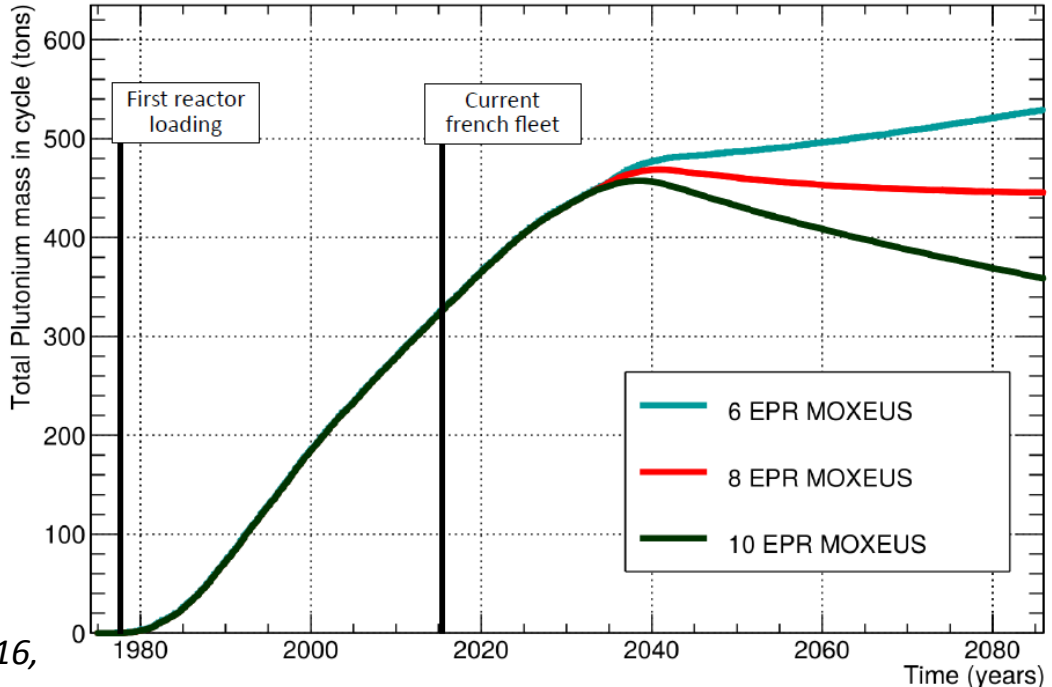
- La stabilisation du Pu :

  Rappels :

  - le multi-recyclage du Pu en REP favorise l'apparition des isotopes paires (non fissiles en REP)







- La sûreté interdit les proportions de Pu supérieur à 11%
  → *On complète la criticité avec de l'235U*

- *On incinère le Pu (ou on le stabilise) mais on consomme plus Unat*

Courtin et al., 2016,

Conclusion

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,…)

Les technologies dépendront de :

La demande globale

Les choix politiques concernant les déchets

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

OUI

Facteur 8 ou plus

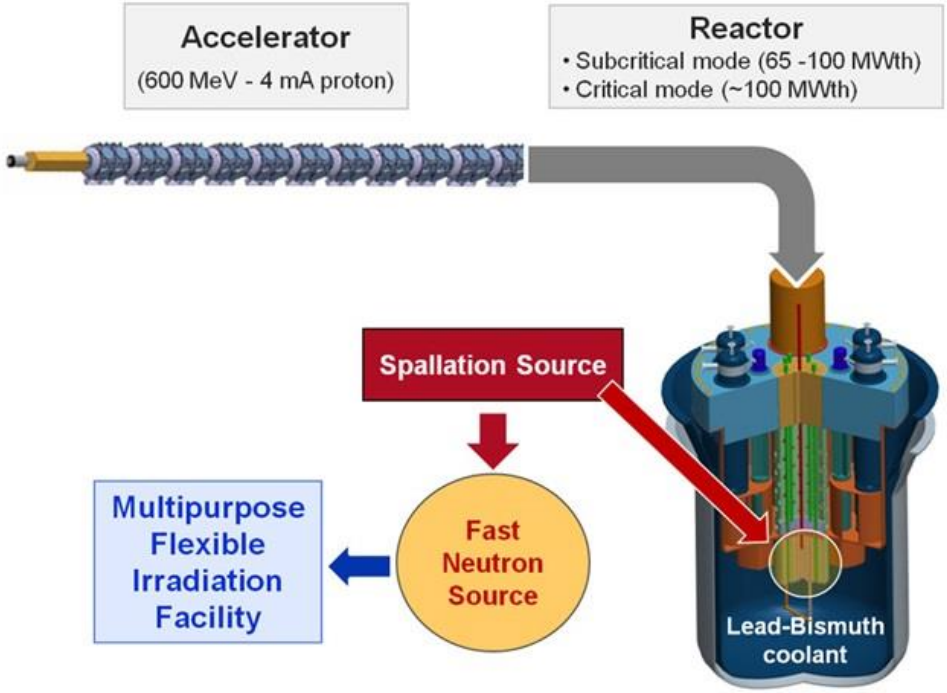
- → La technologie actuelle consome trop d'uranium naturel
- → Il faudra entamer une transition GENIII-GENIV (qui nécessite une grande quantité de Pu)
- → Plutonium est une matière valorisable

NON

Facteur 2

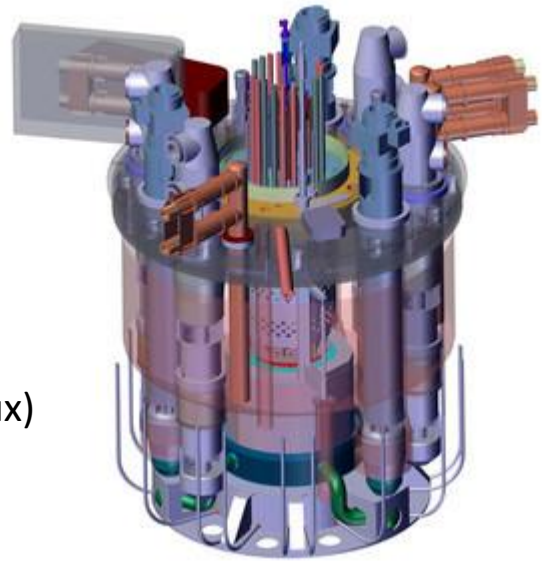
- → L'économie d'uranium n'est pas prioritaire
- → Les réacteurs GENIII sont satisfaisants
- → Plutonium est le déchet principal

A l'échelle européenne : deux grands projets



MYRRHA (SCK-CEN ; Belgique)

- refroidit au plomb
- Critique et sous-critique
- 100 MW thermique
- Non raccordé au réseau



ASTRID (CEA ; France)

- refroidit au sodium
- Critique (plan de chargement très ambitieux)
- 600 MWe

Quelques messages personnels…

1/

Une question « à la con »… qui dépasse largement le cadre du cours

Une réponse (que j'espère) « pas à la con »… qui montre la difficulté d'un débat raisonnable

Réponse limité disciplinairement (on n'a pas parlé des matériaux, du retraitement, de la sûreté,…)

Réponse limité dans sa portée…

→ *Nécessité de **l'interdisciplinarité** (Sciences de l'énergie, économie, sociologie,…)*

2/

IN2P3 =

Expertise en détection

+ Expertise en physique nucléaire (expérimentale et théorie)

+ Expertise en simulation (Monte-Carlo + Machine learning + Big data)

→ *Positionnement unique « académique » sur cette problématique (sphère publique)*

3/

Historiquement Le CNRS/IN2P3 s'implique dans la thématique via les sciences fondamentales

→ *Spallation (et physique des accélérateurs) et physique nucléaire*

Changement de paradigme : un nouveau contexte énergétique pour de nouvelles recherches

→ *Données nucléaires (mécanismes de fission, modélisation du noyau)*

→ *Réacteurs & cycle innovant ; stratégie d'attente et de rupture*