

Energie nucléaire du futur : Défis et enjeux de la recherche

La problématique de l'aval du cycle électronucléaire

De la physique au détecteur
Bénodet, novembre 2017

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

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



Les Français et l'énergie nucléaire

Ifop pour la Conférence #tcherno23

Etes-vous pour ou contre l'arrêt des centrales nucléaires en France ?

47%

53%

Quelles sont les deux raisons qui expliquent le plus que vous soyez pour l'arrêt des centrales ?

Quelles sont les deux raisons qui expliquent le plus que vous soyez contre l'arrêt des centrales ?

Production de déchets radioactifs pendant des millions d'années

Indépendance énergétique

Crainte d'un accident nucléaire en France

Production d'électricité à un coût très compétitif

Une feuille de route donnée par le gouvernement

LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte

- Réduction de la part du nucléaire à 50% à l'horizon 2025
- Fermeture de Fessenheim

- ... **MAIS ??** → Ouverture de 2 EPR en UK
- Démarrage de l'EPR (puissance nucléaire normée)
- Maintien du recyclage du combustible nucléaire

Pour une sortie du nucléaire



11 juillet 2017

Plutôt un statuquo !



8 novembre 2017

Une histoire qui ne favorise pas vraiment le débat :

- 1932 → Découverte du neutron
- 1938 → Phénomène de la fission induite
- 1939 → Preuve théorique d'une réaction en chaîne
- 1941 → Premier réacteur nucléaire
- 1948 → Le CEA construit la première pile française ZOE
- 1966-1971 → Construction UNGG
- 1973 → 1^{er} choc pétrolier
- 1974 – 1980 → Engagement de l'équivalent de 55 réacteurs



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



- Définit le rôle des grands acteurs (ASN et IRSN, ANDRA, Organisme de recherches)



L'IN2P3 est mobilisé depuis ~1995

- Recherches contraintes par la loi
- Acteur de l'enseignement
- Expertise académique

Arrêté du 29 avril 2016 :

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

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

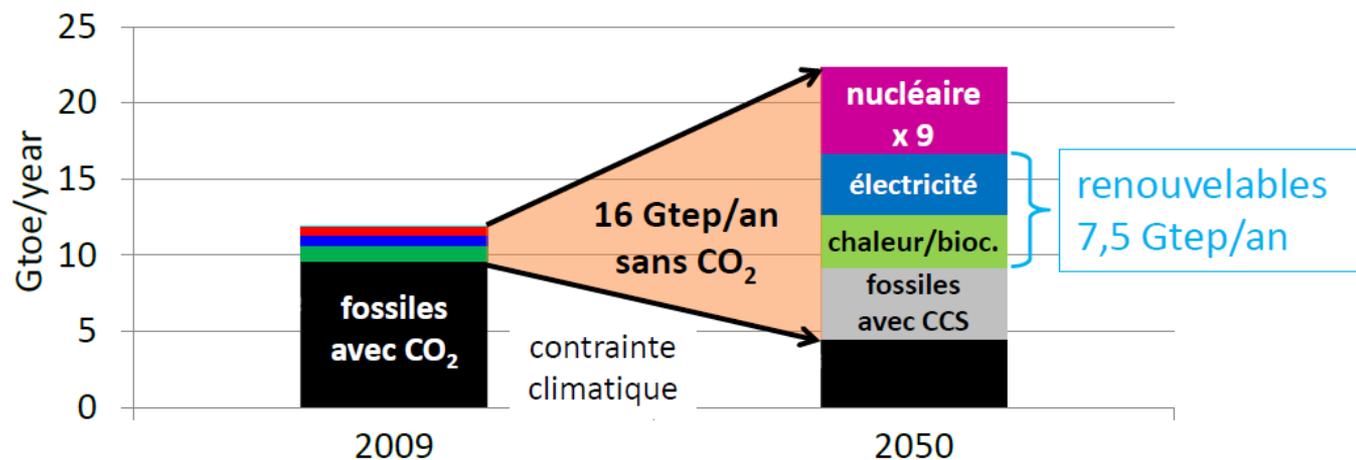
Electricité nucléaire = 0 gCO₂/TWh en fonctionnement

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



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

1/Physique nucléaire et physique des réacteurs

La fission, la réaction en chaîne 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

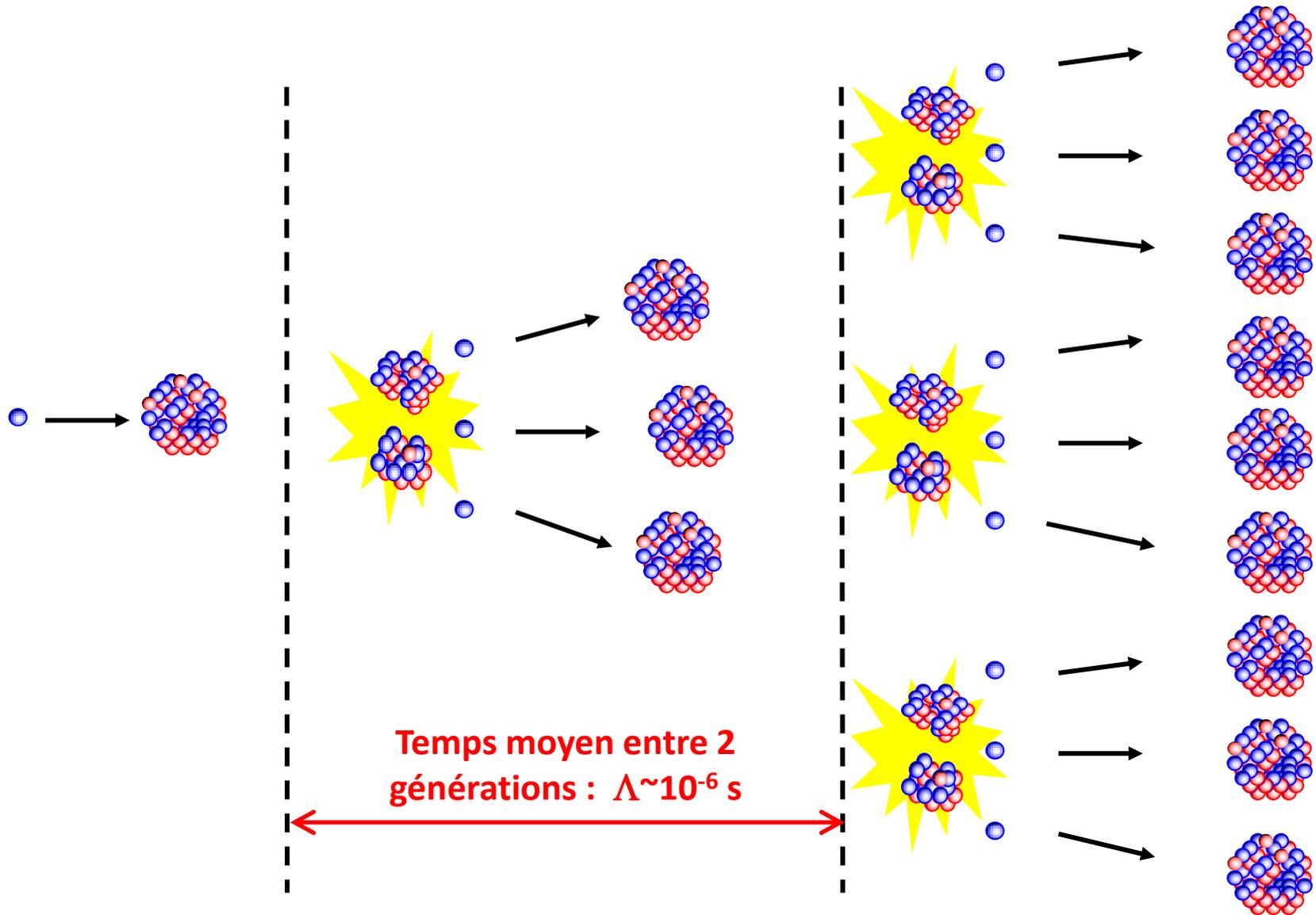
Qu'est ce que c'est ?
Un choix pour le futur et donc un non-choix ?

Conclusions

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

La fission et la réaction en chaîne :

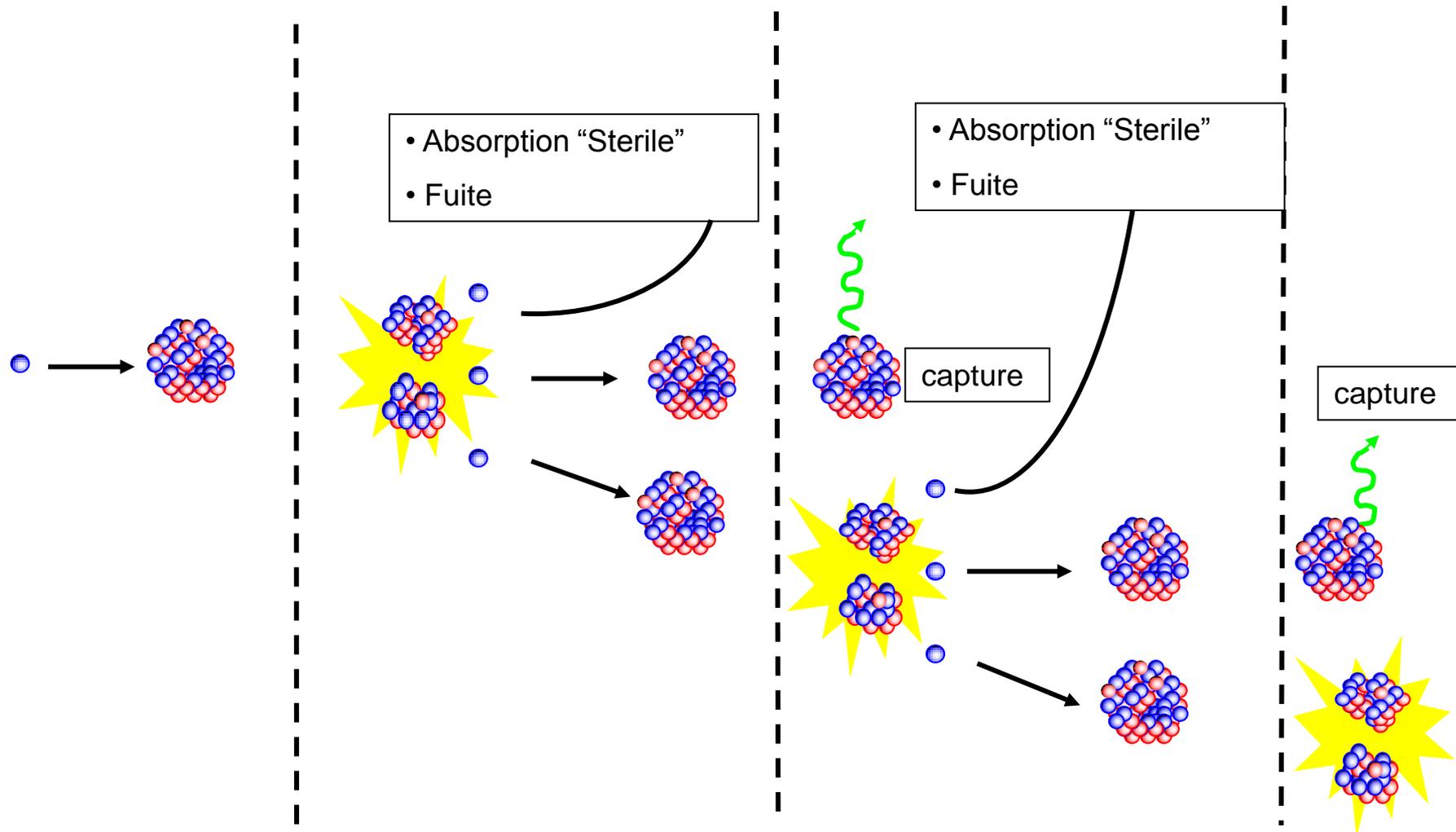
- *La fission des noyaux lourds libère entre **2 et 3 neutrons**, produit deux **fragments de fission** et une grande quantité d'énergie (**200 MeV**)*



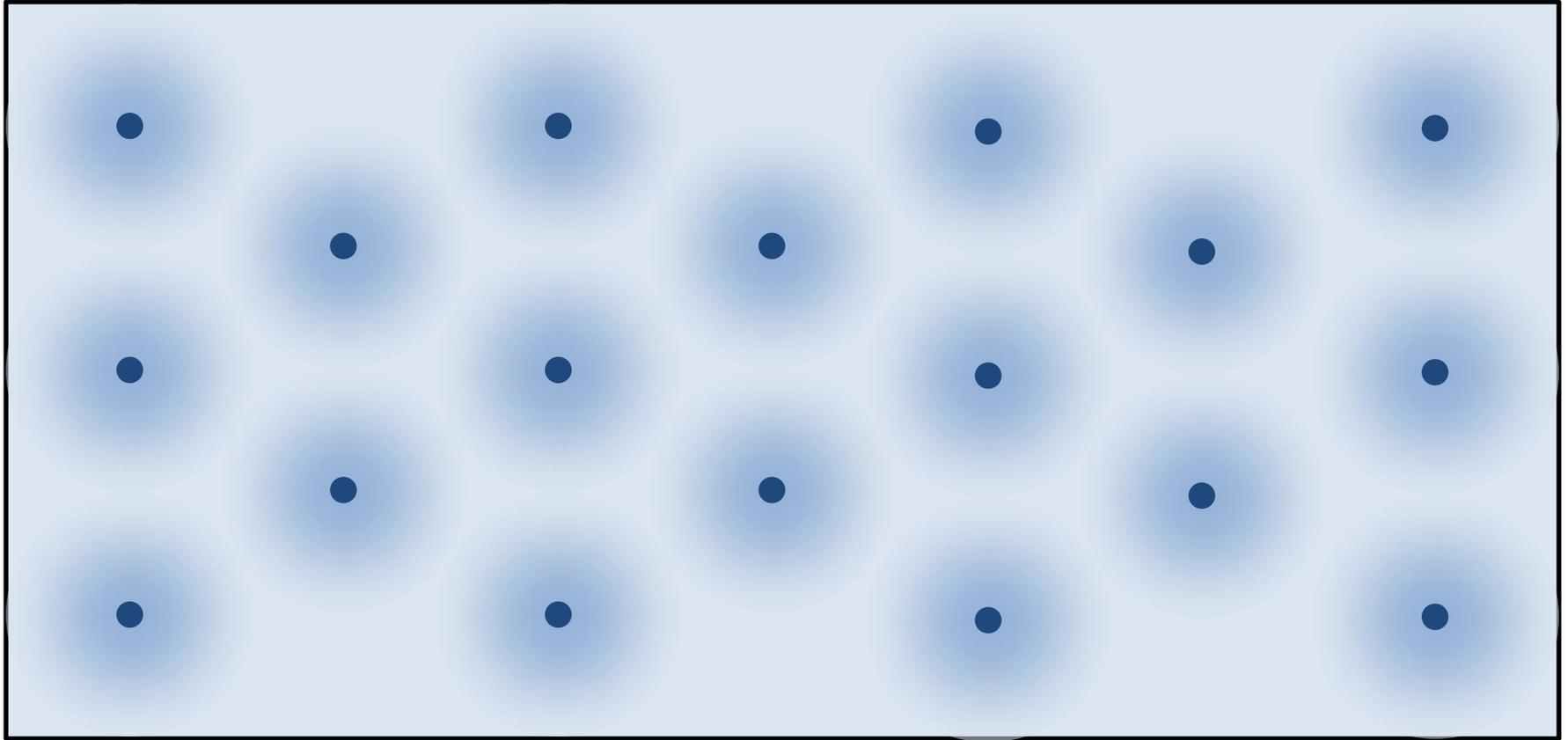
La fission et la réaction en chaîne :

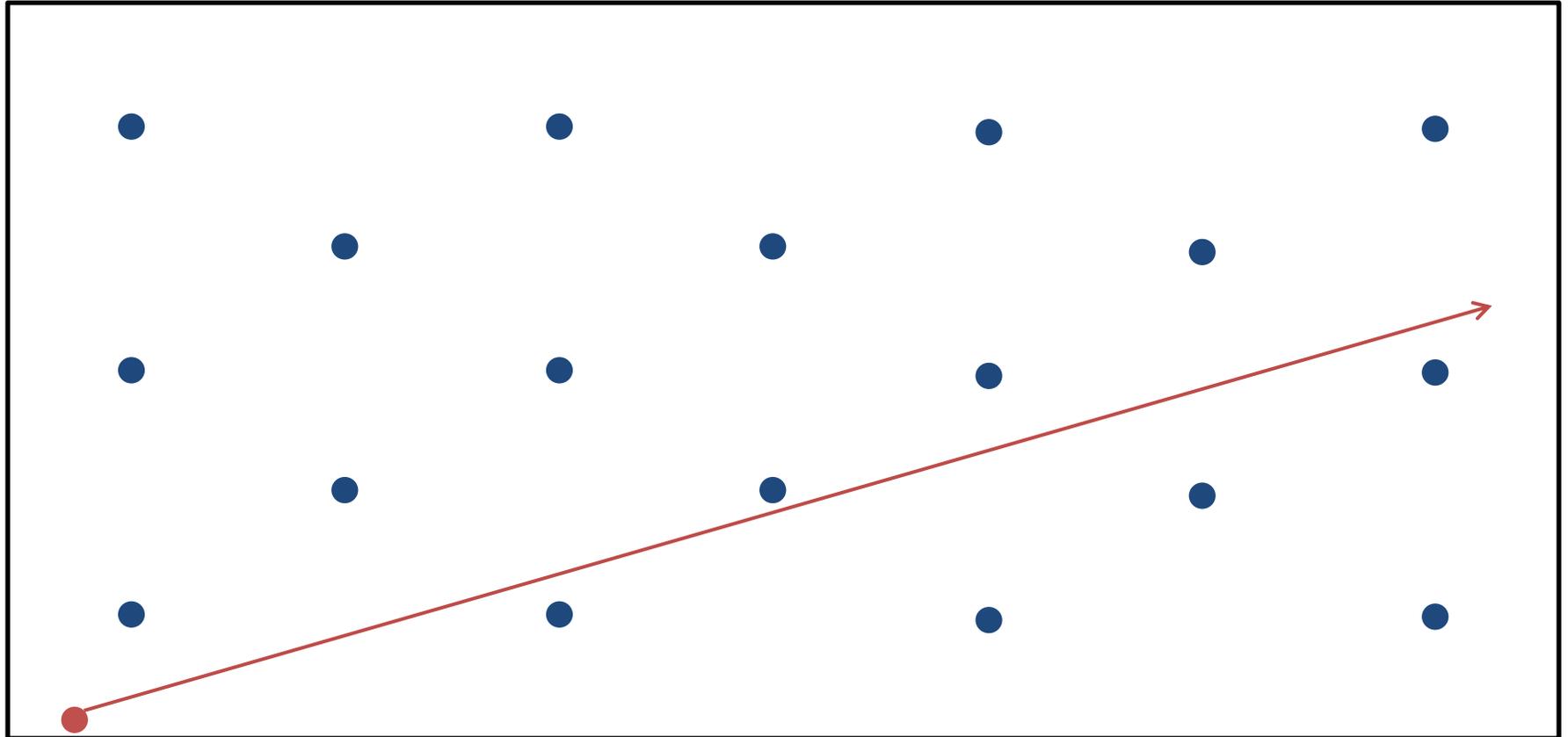
On définit la criticité (ou la réactivité) ou la multiplication des neutrons (k)

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



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



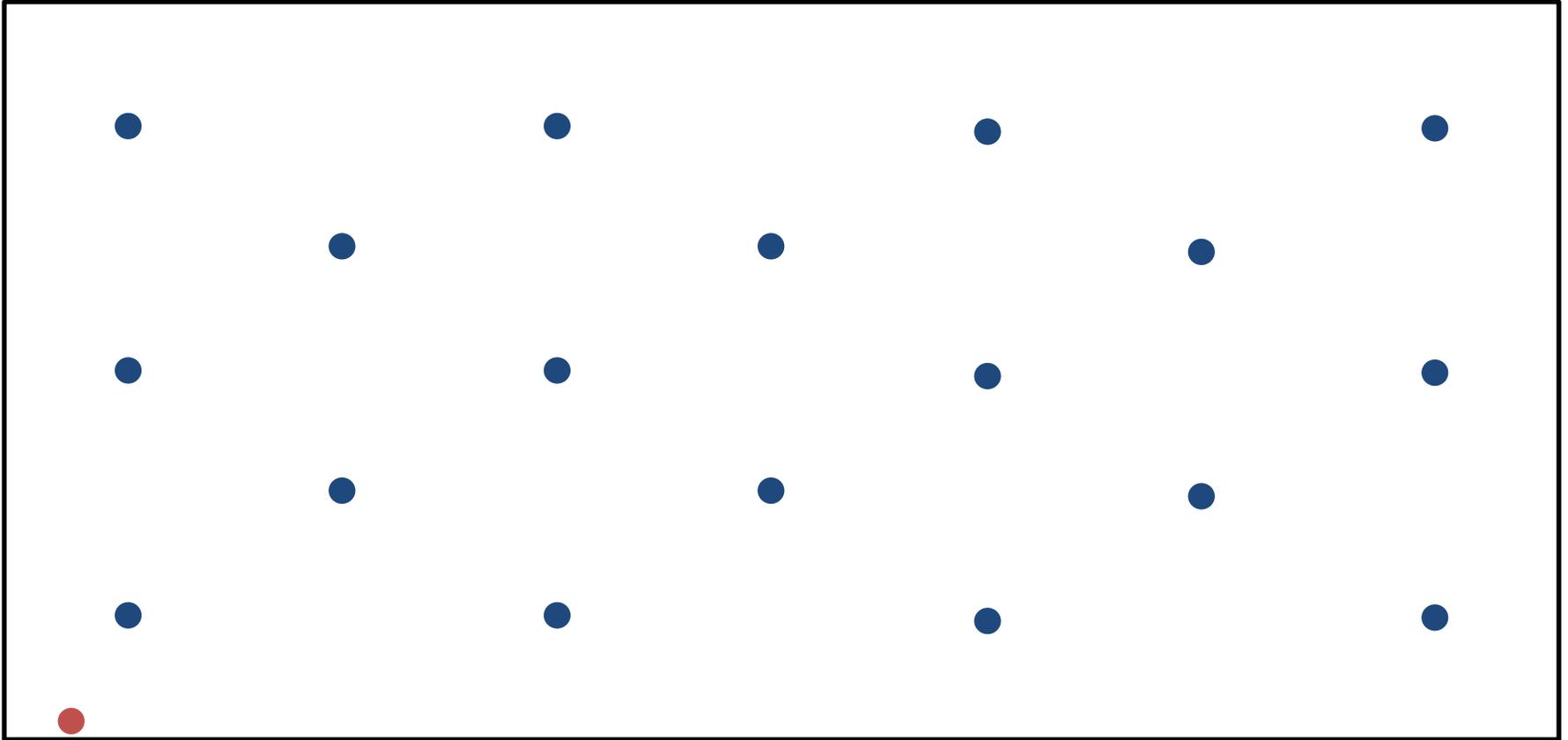


Les neutrons parcourent de grandes distances sans interagir avec la matière

Pas de système nucléaire de taille « microscopique »

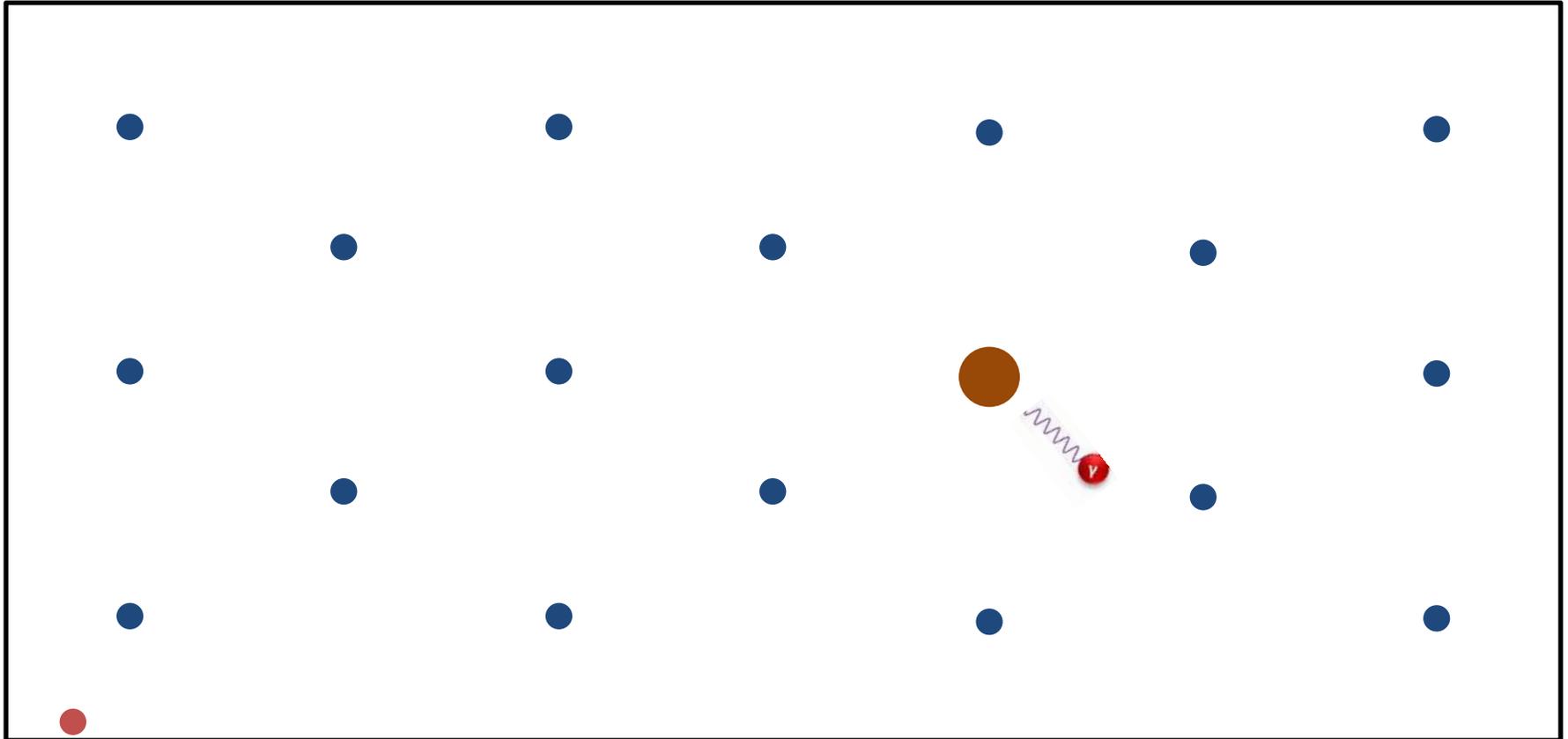
L'interaction des neutrons avec la matière et la criticité

- 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

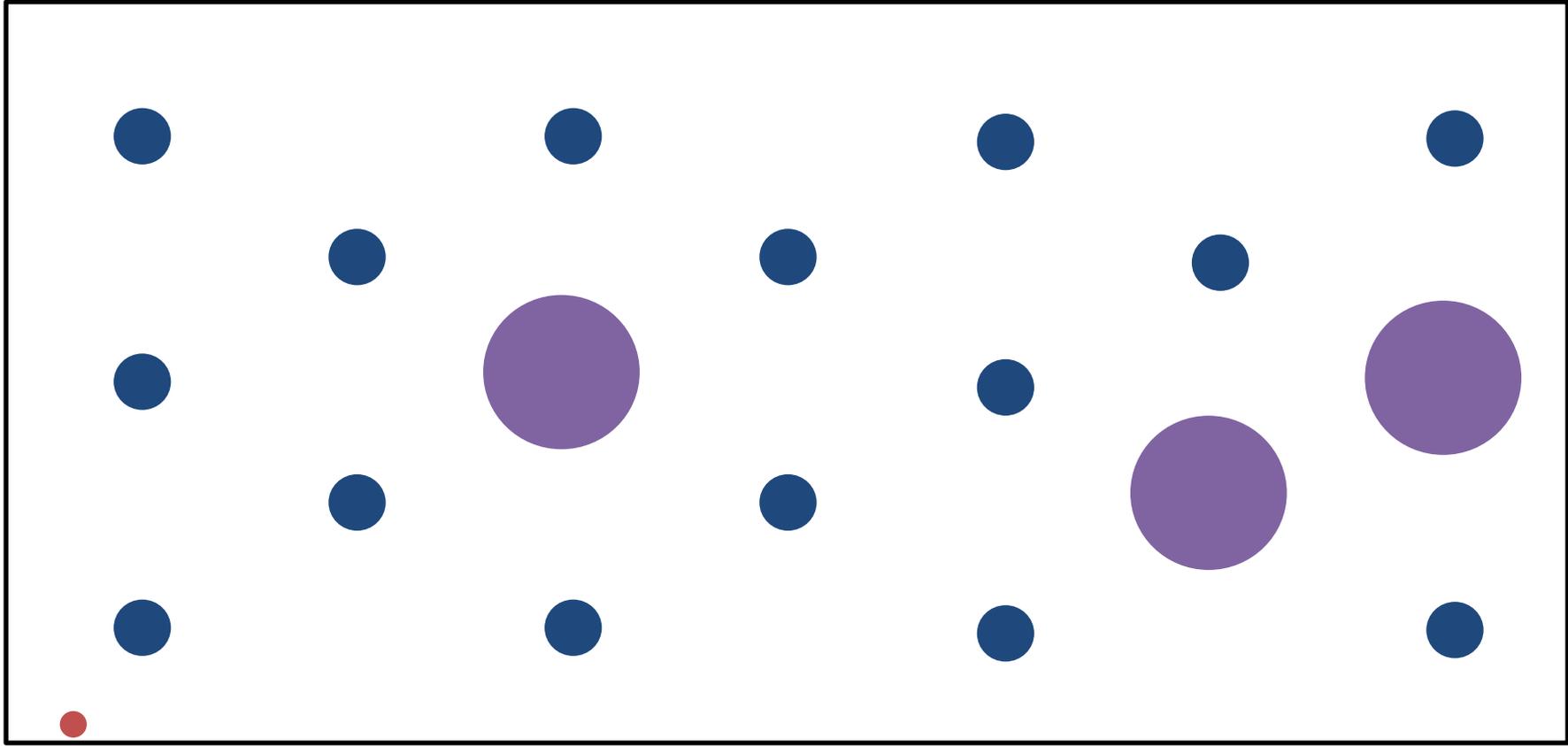
Dans les autres cas, l'absorption est dite stérile

→ Bilan neutronique = -1 neutron

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

L'interaction des neutrons avec la matière et la criticité

- 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'²³⁵U 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)

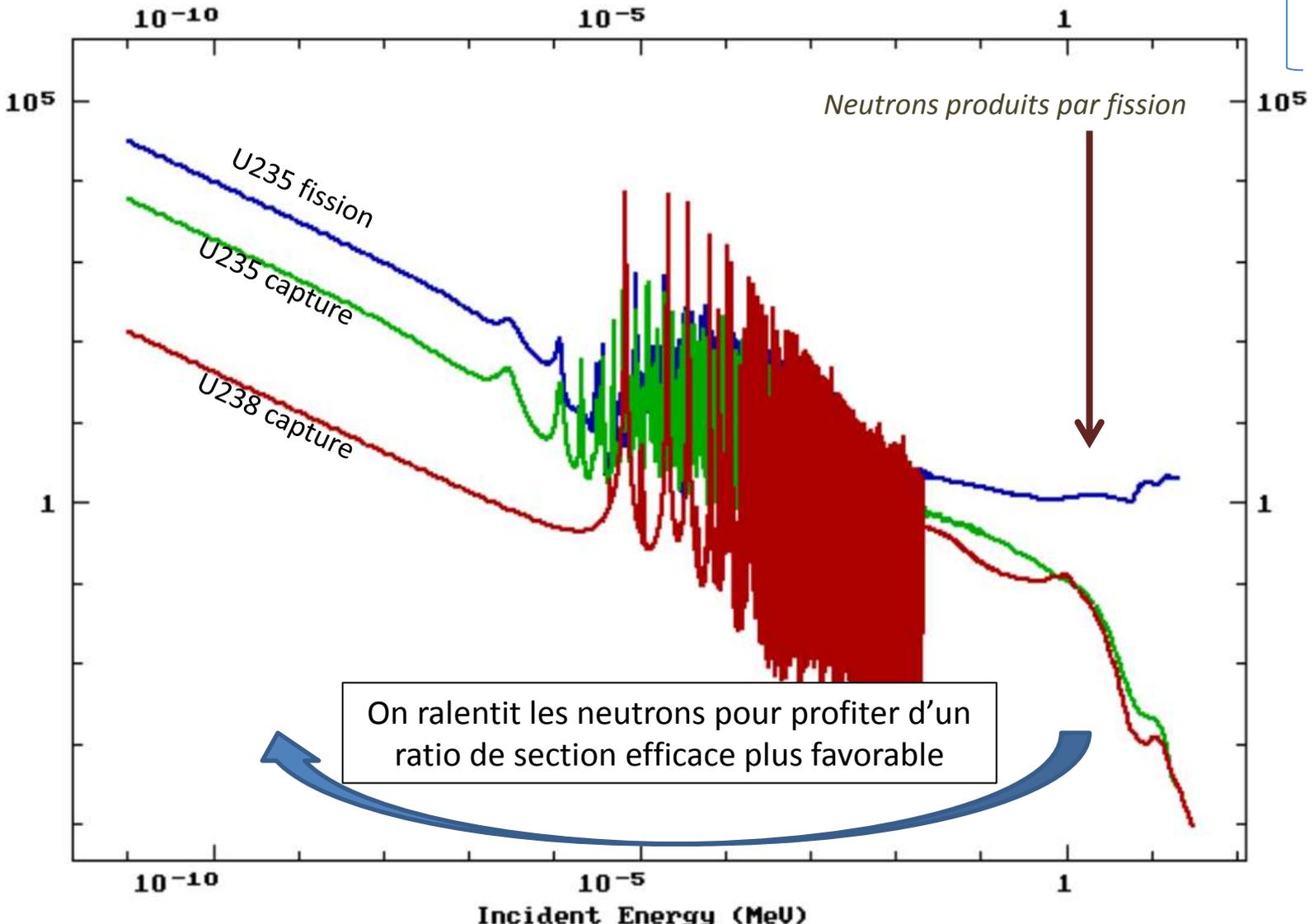
Densité de noyau i (noyau.cm⁻³)

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

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

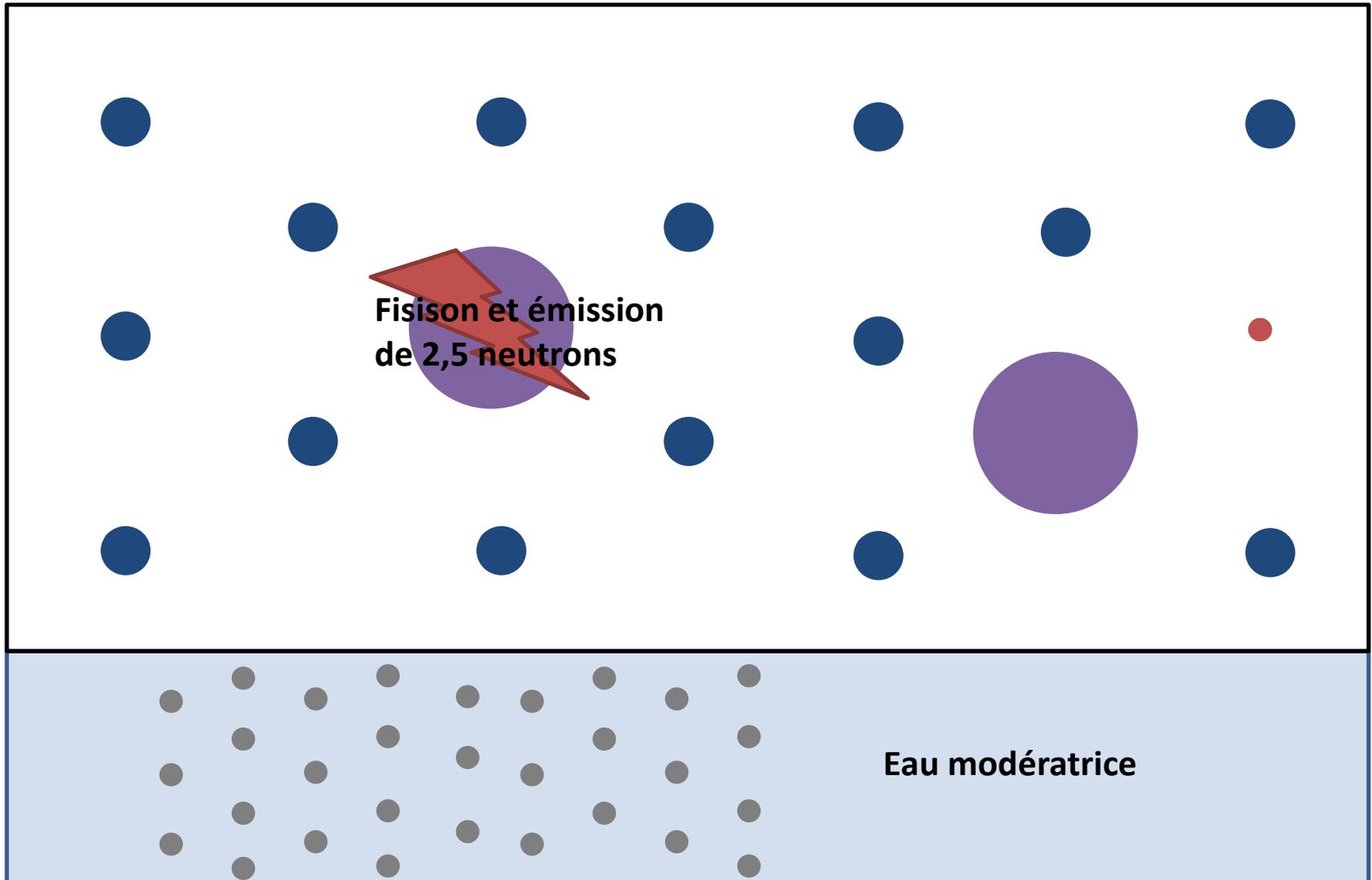
$$= \frac{\nu N_{U235} \sigma_f \phi}{\sum_{i,r} N_{i,r} \sigma \phi}$$



L'interaction des neutrons avec la matière

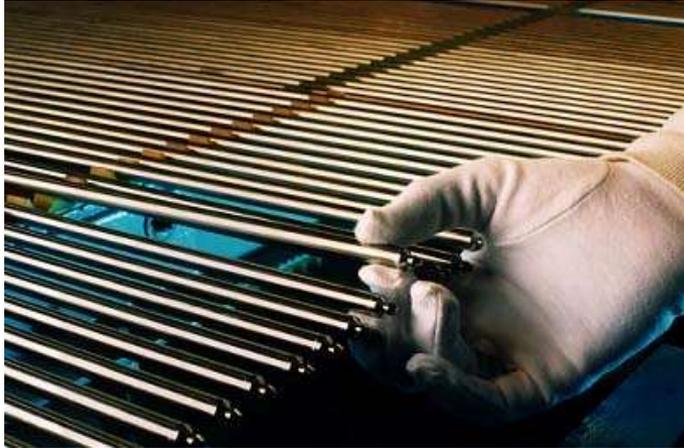
- L'eau dans les réacteurs est indispensable pour :
 - Refroidir le combustible
 - Ralentir les neutrons

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

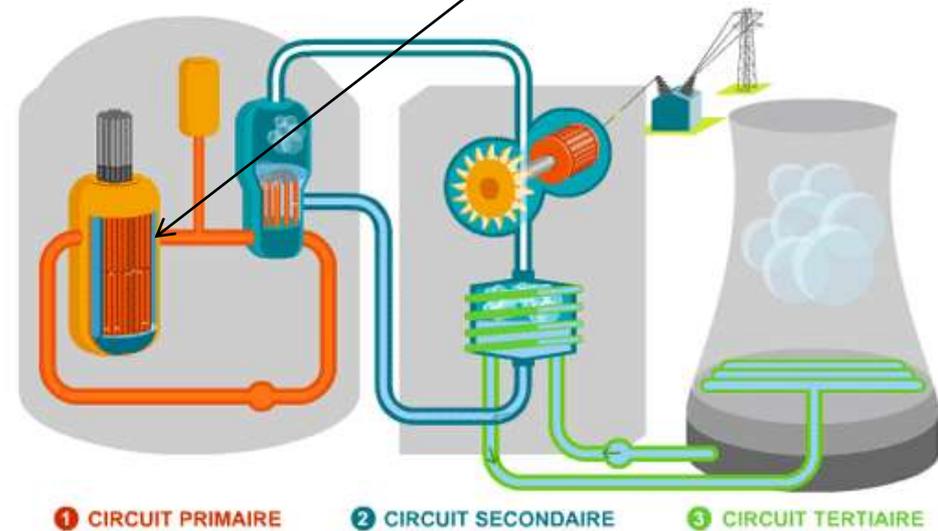


Les réacteurs à eau sous pression

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

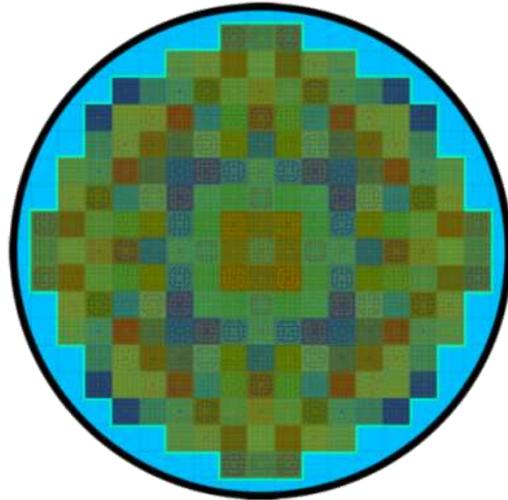


L'eau circule dans l'espace entre les crayons - refroidit le combustible et ralentit les neutrons



L'équation du transport

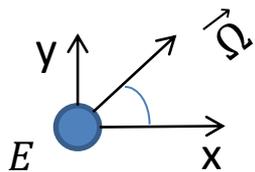
➤ La simulation de réacteurs : un enjeu de recherche pour la sûreté et les scénarios



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

Libre parcours moyen des neutrons $\sim cm$
 Section assemblage $\sim 20 cm \times 20 cm$
 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 :

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

Variation du flux
neutronique

Fuites

Réaction

Réaction de transfert

Source de fission

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

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

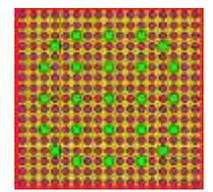
→ Taux de réaction = $N \sigma \Phi$

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

Calcul cellule

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

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



Angle $\vec{\Omega}$

Énergie E

Espace \vec{r}

Approximation de la diffusion

condensation

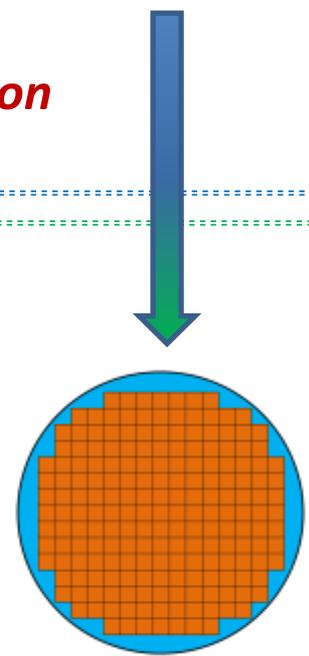
homogénéisation

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

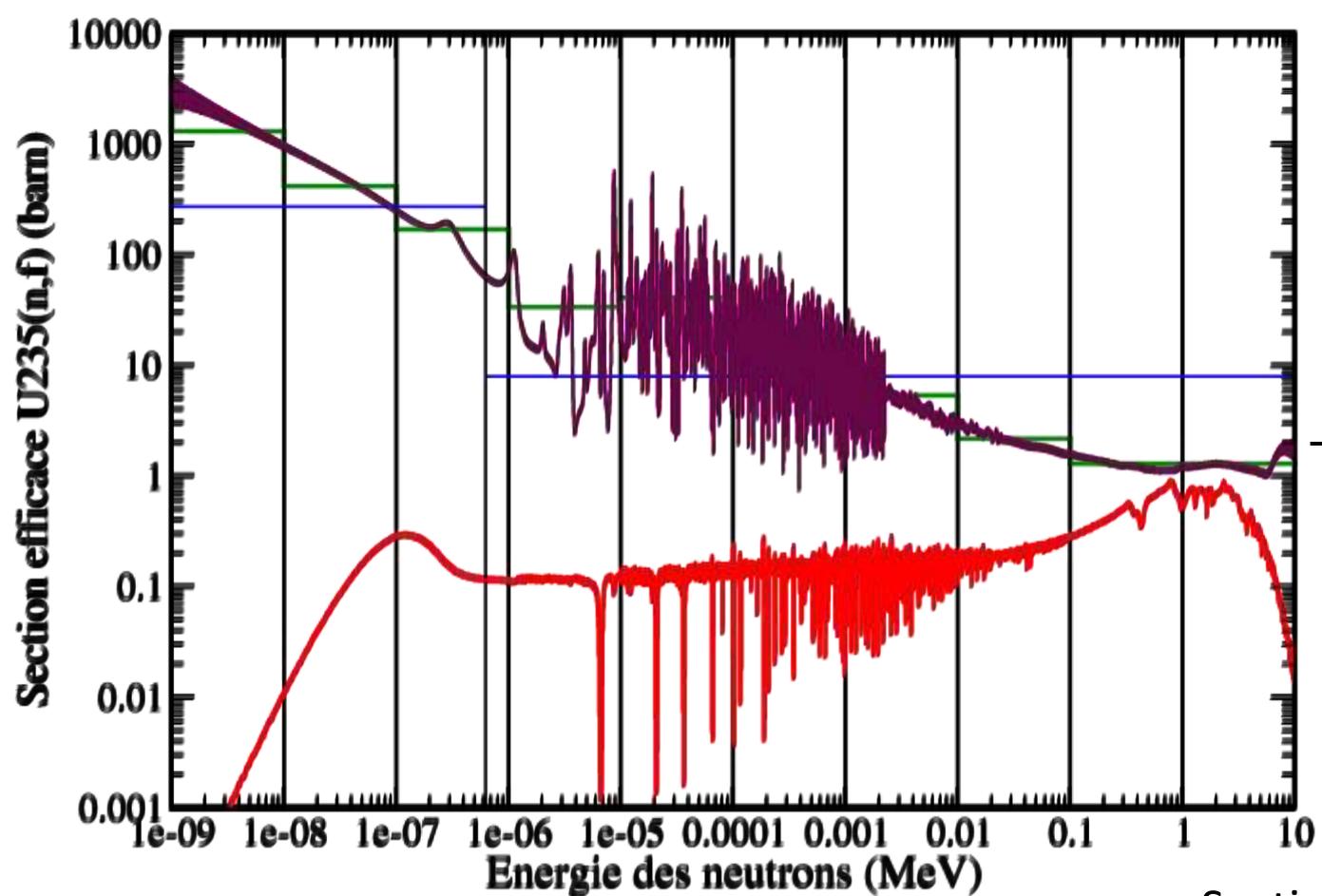
Calcul cœur

$$\Sigma = N \cdot \sigma$$
$$-D \Delta \Phi = v \Sigma_f \Phi - \Sigma_a \Phi$$

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
 σ_{fiss}^{235U}

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

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

Flux
neutronique
 $\Phi(E)$

Section efficace multigroupe :

Flux multigroupe :

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

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

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



➤ L'évolution

- L'évolution de chaque noyau est régit par l'équation :

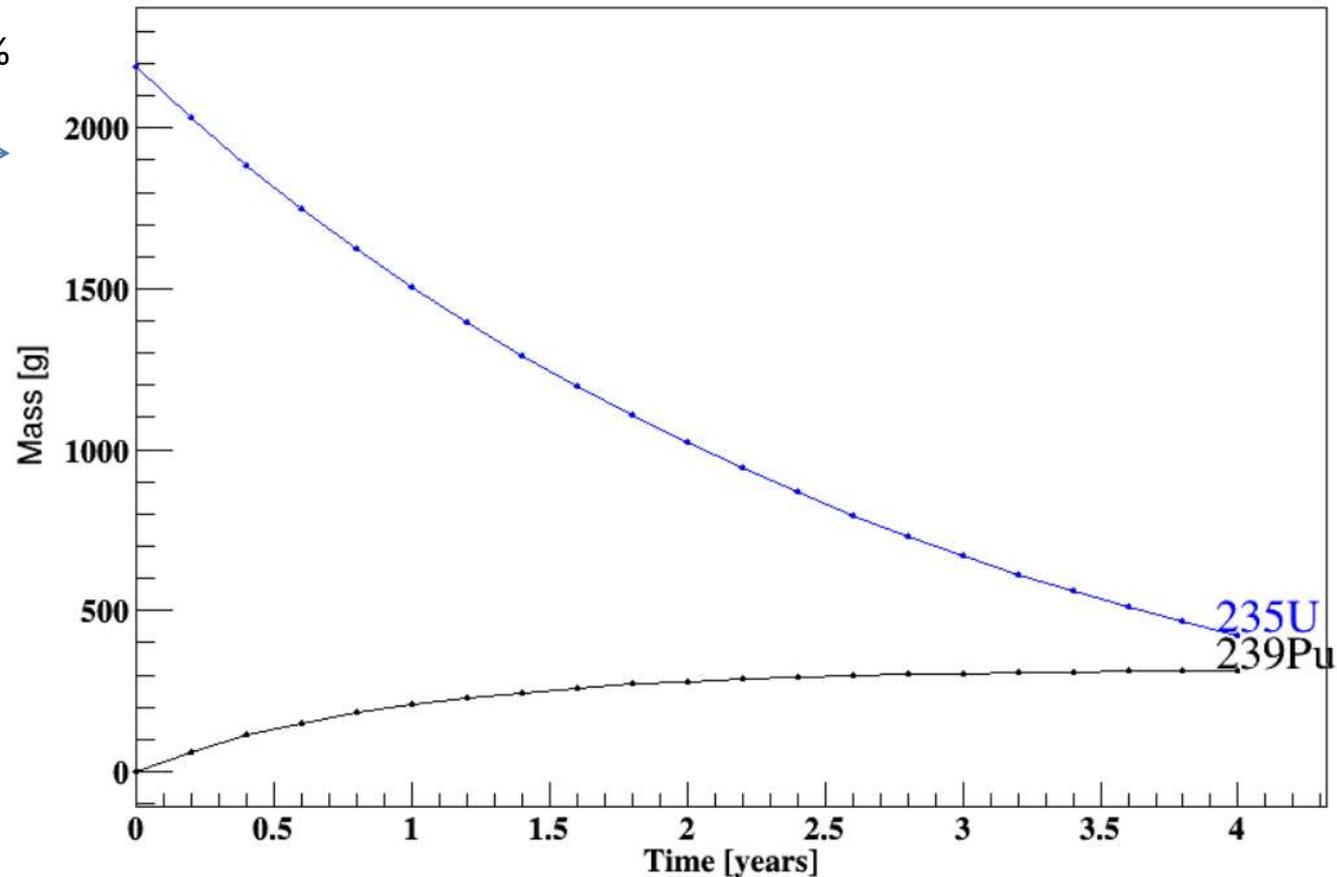
$$\frac{dN_i}{dt} = \underbrace{\sum_j N_j R_j \sigma_j^{j \rightarrow i} \phi + \sum_j \lambda_j^{j \rightarrow i} N_j}_{\text{production}} - \underbrace{N_i \sigma^{abs} \phi + \lambda_i N_i}_{\text{disparition}}$$

variation = production - disparition



Condition initiale :

→ UOX @ 3.5%



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

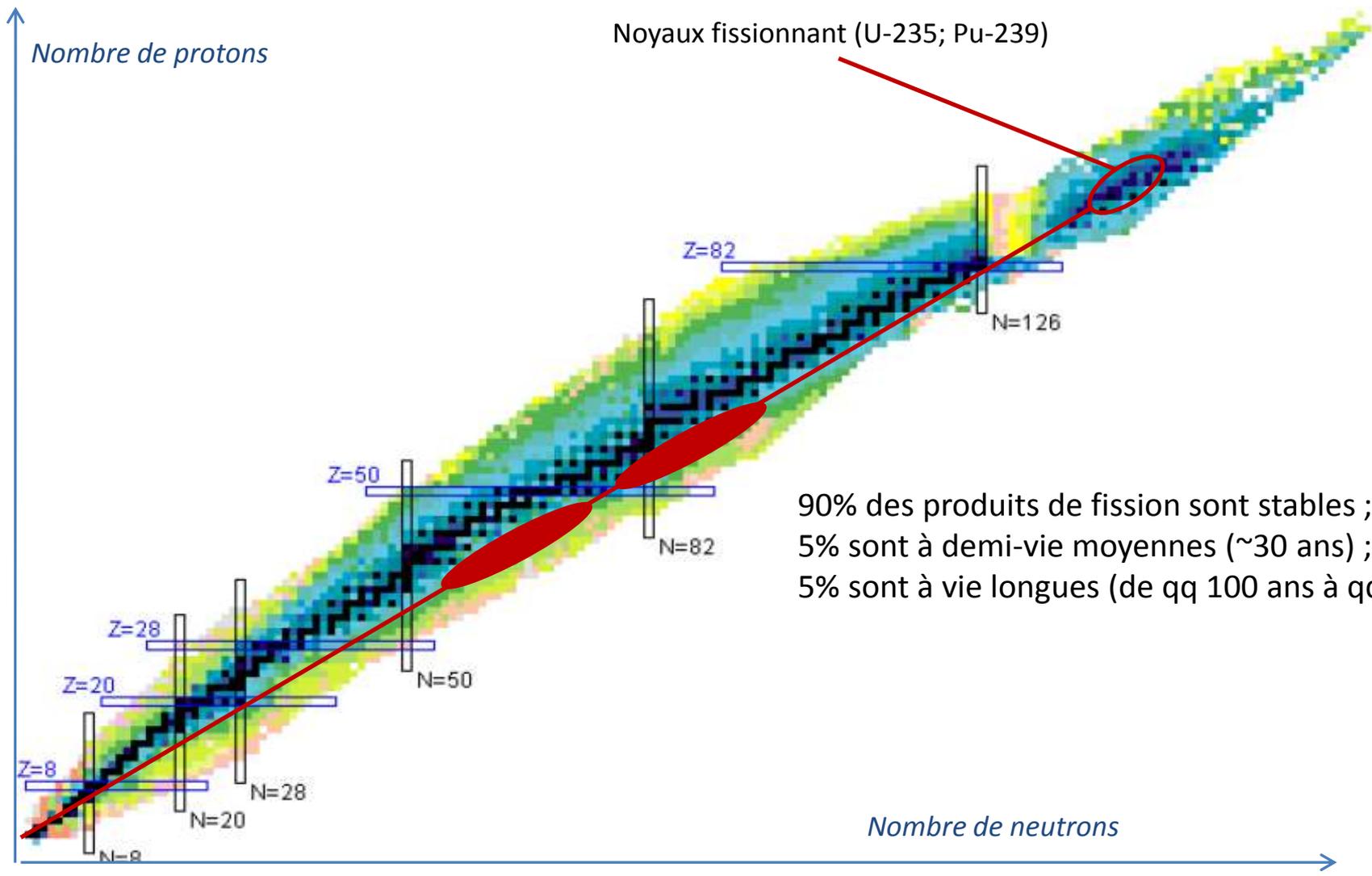
L'intérêt de la stratégie française

3/ Les ressources en uranium naturel

4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

Conclusions

La fission

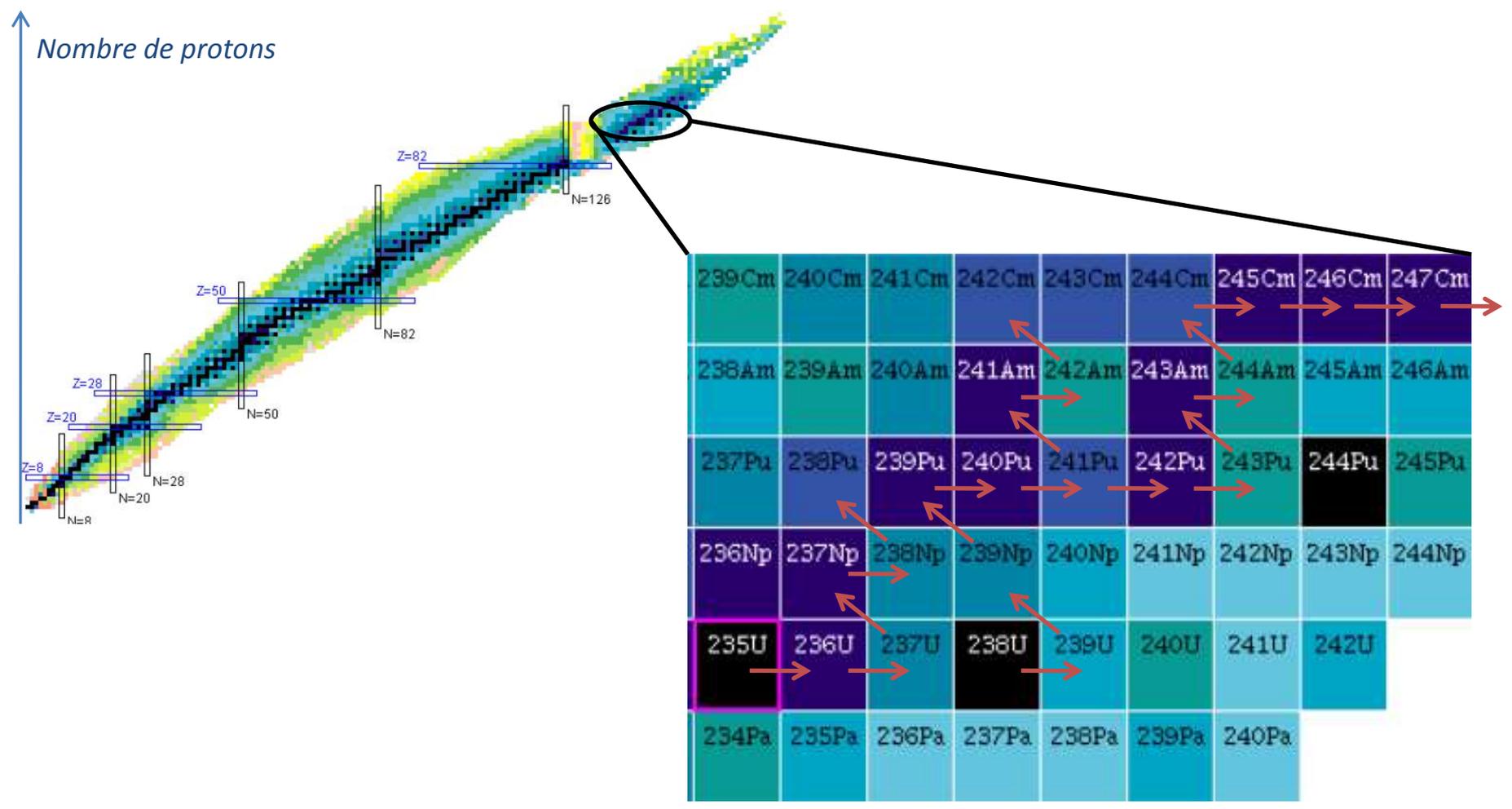


90% des produits de fission sont stables ;
5% sont à demi-vie moyennes (~30 ans) ;
5% sont à vie longues (de qq 100 ans à qq 10⁶ ans)

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

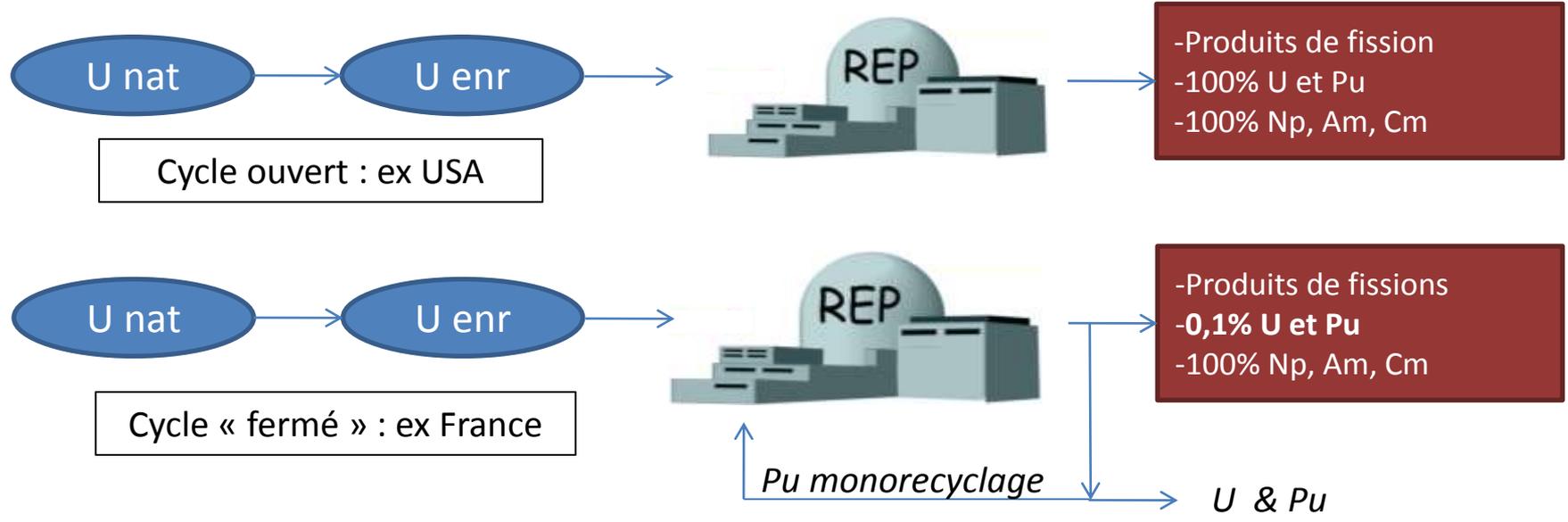
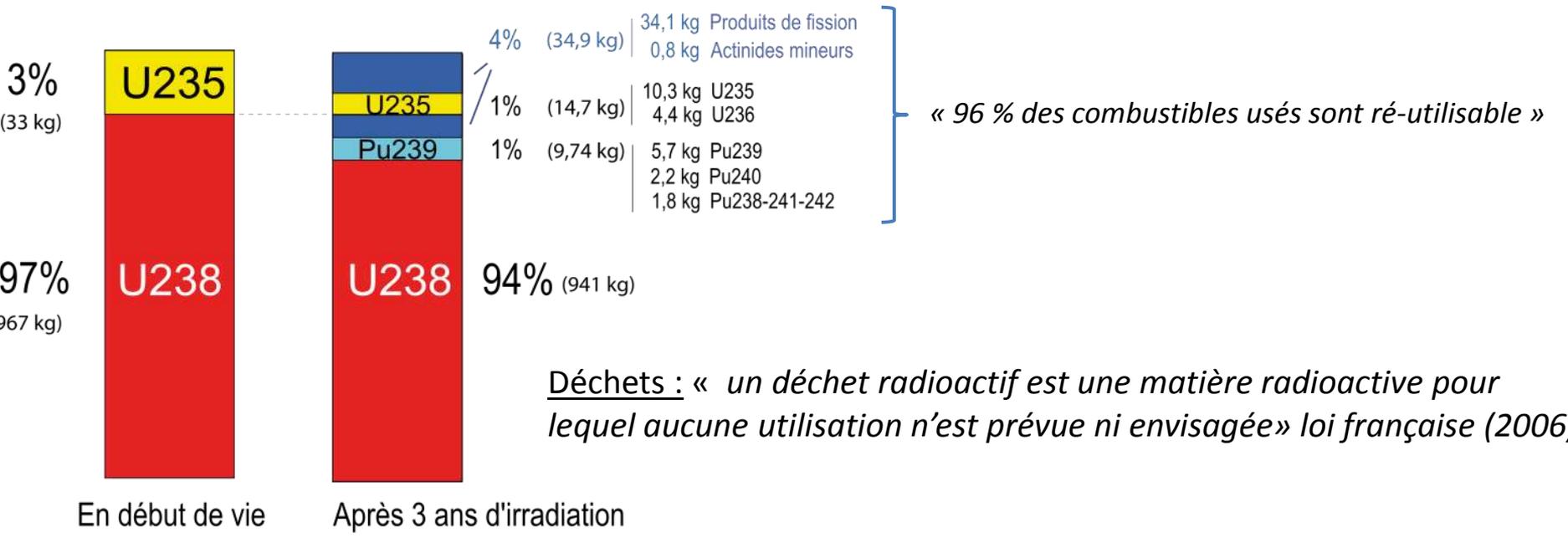
Une semaine après l'arrêt le dégagement de chaleur correspond à 9000 radiateurs dans un studio parisien

La fission



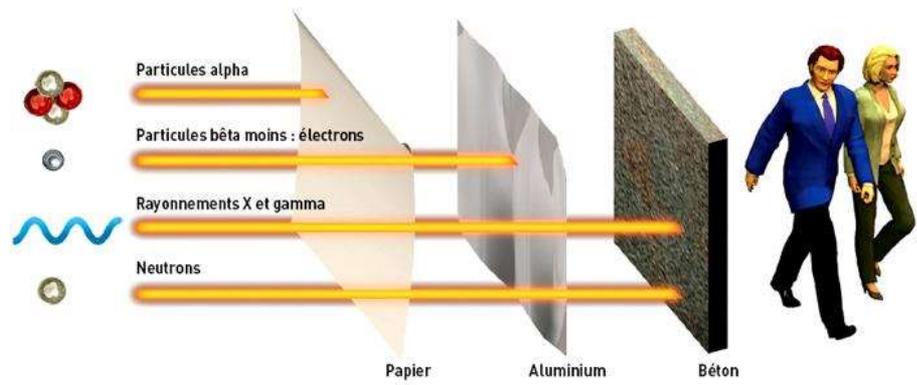
- L'irradiation produit des noyaux lourds par captures neutroniques :
- Le plutonium est produit par capture sur l'238U
 - Les autres éléments sont les actinides mineurs !

Déchets nucléaires

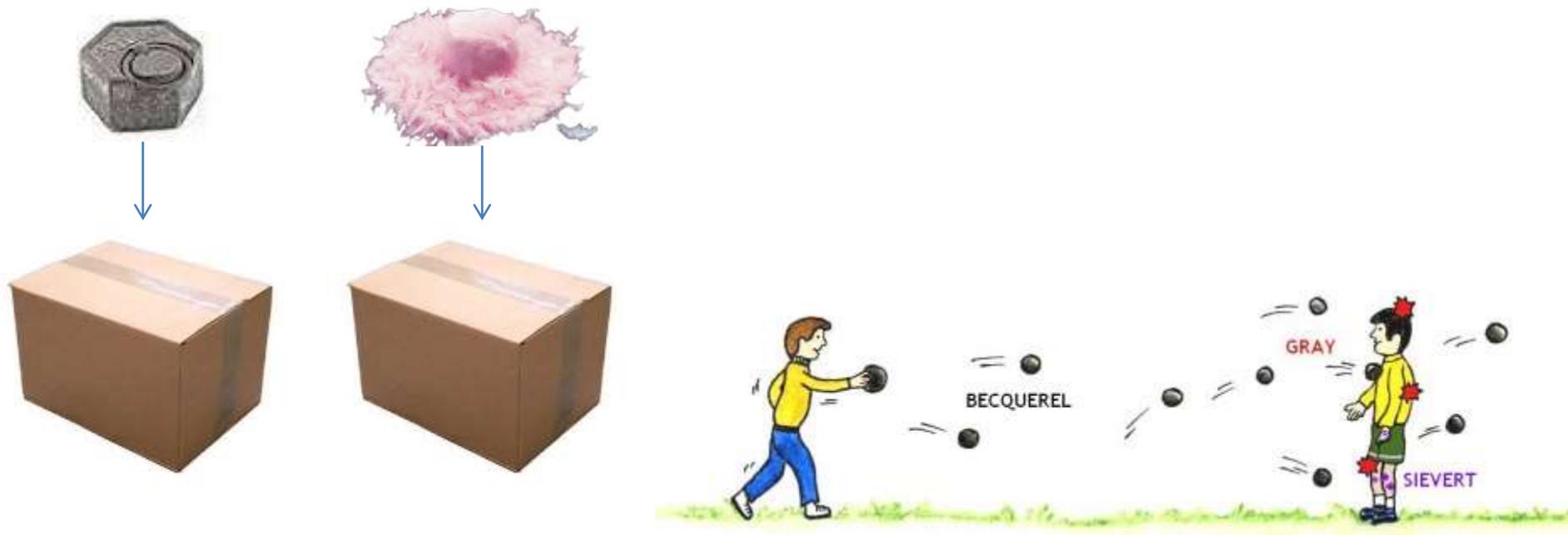


Un point sur les unités (ou pourquoi on n'y comprend rien)

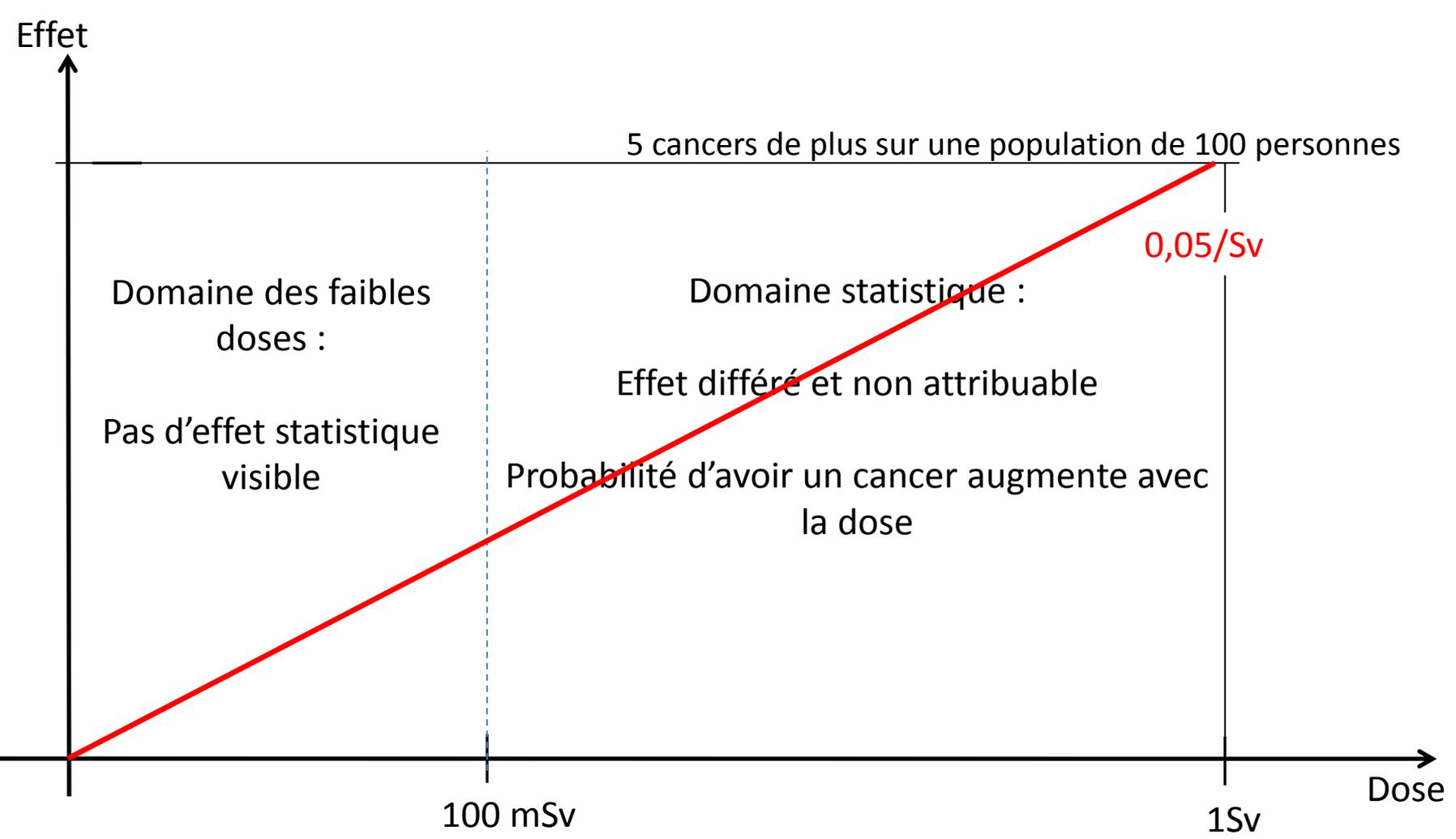
- Unité de la radioactivité : le Becquerel (nombre d'évènement par secondes sans distinction du type, de l'énergie, etc...)
→ Activité de l'homme : ~1000 Bq/kg



- Pour mesurer les dommages on peut utiliser le Gray ; c'est l'énergie massique déposée ($1\text{Gy} = 1\text{J} / \text{kg}$)



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



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

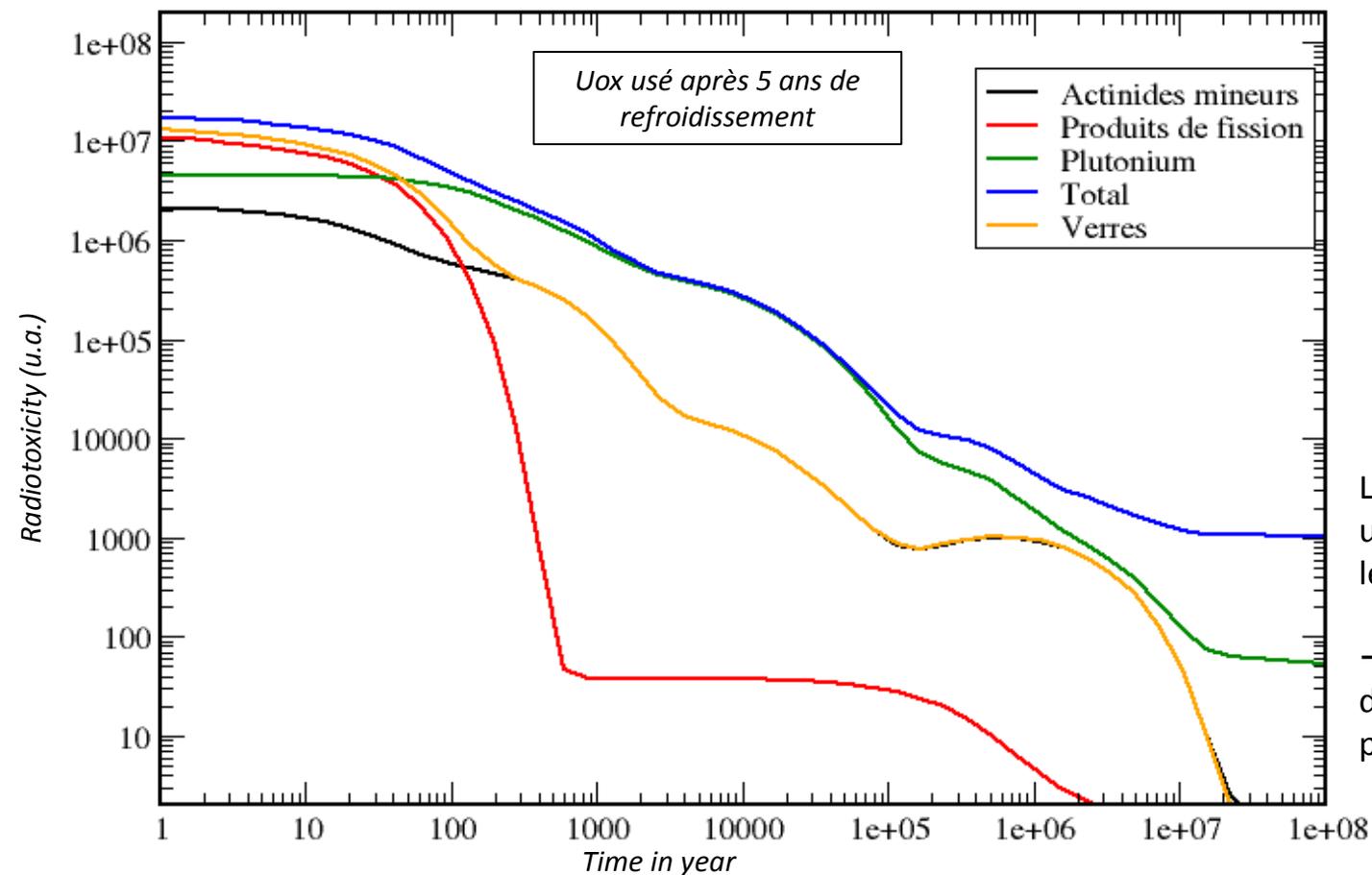
Comment qualifier les déchets nucléaires ?

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

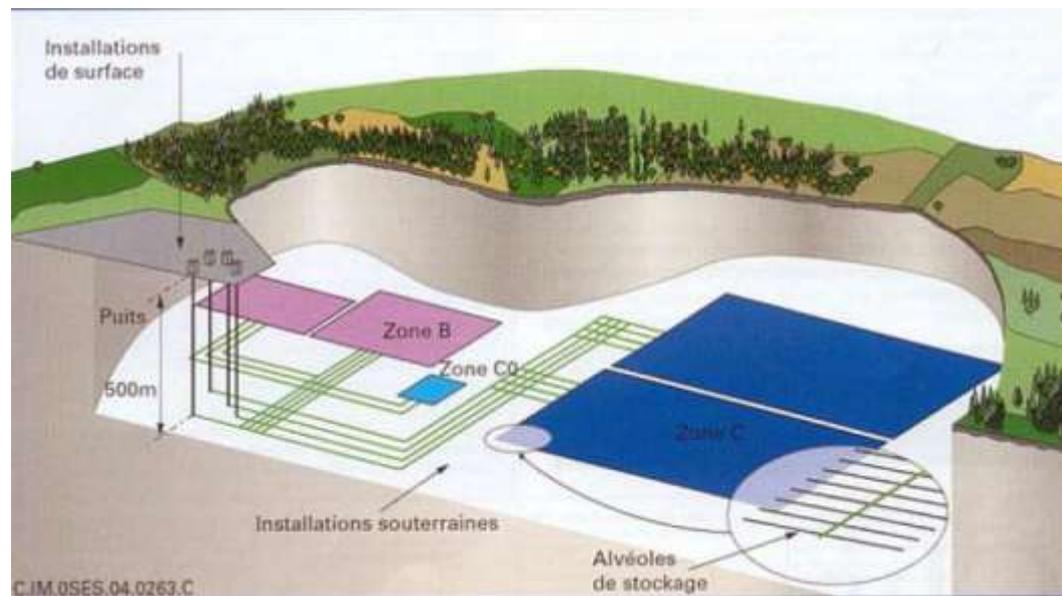
→ la radiotoxicité ne présente rien de réel mais est un bon moyen pour comparer les déchets



Le but du stockage est d'offrir une possibilité de gestion pour les déchets à vie très longue

→ Cependant, le dimensionnement est du aux produits de fission

Le stockage en couche géologique profonde

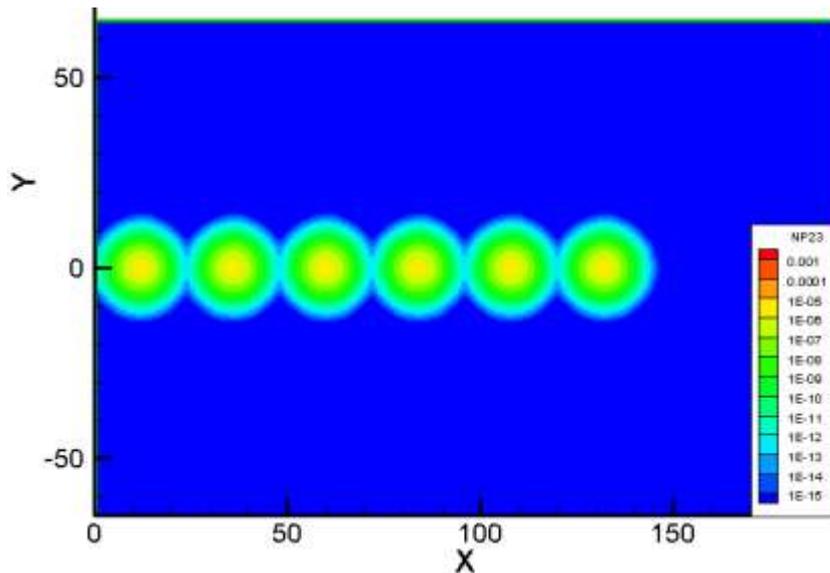


Deux types de déchets à vie longue

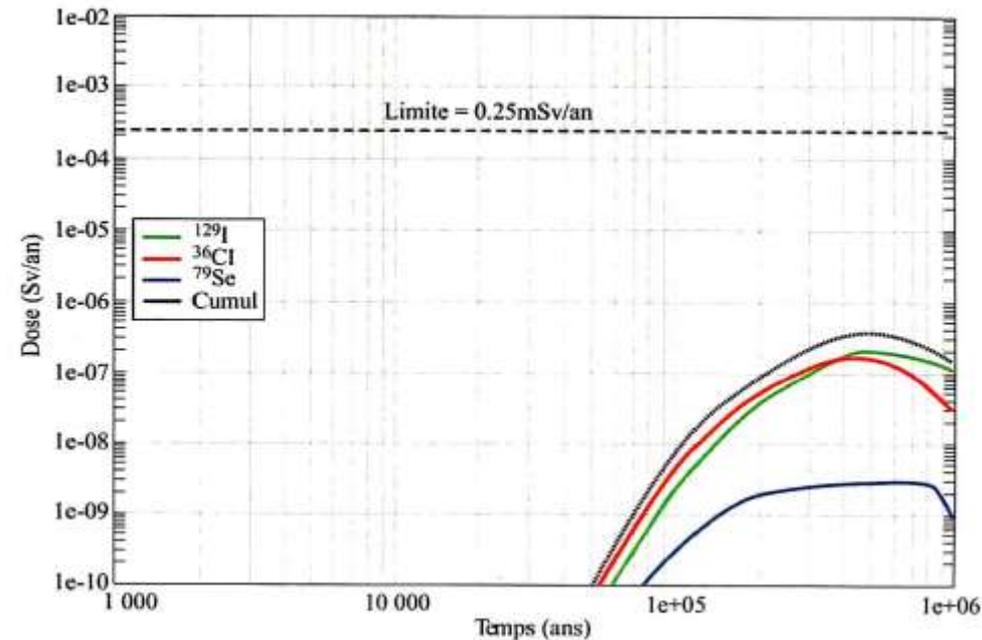
- Haute activité
- Moyenne activité



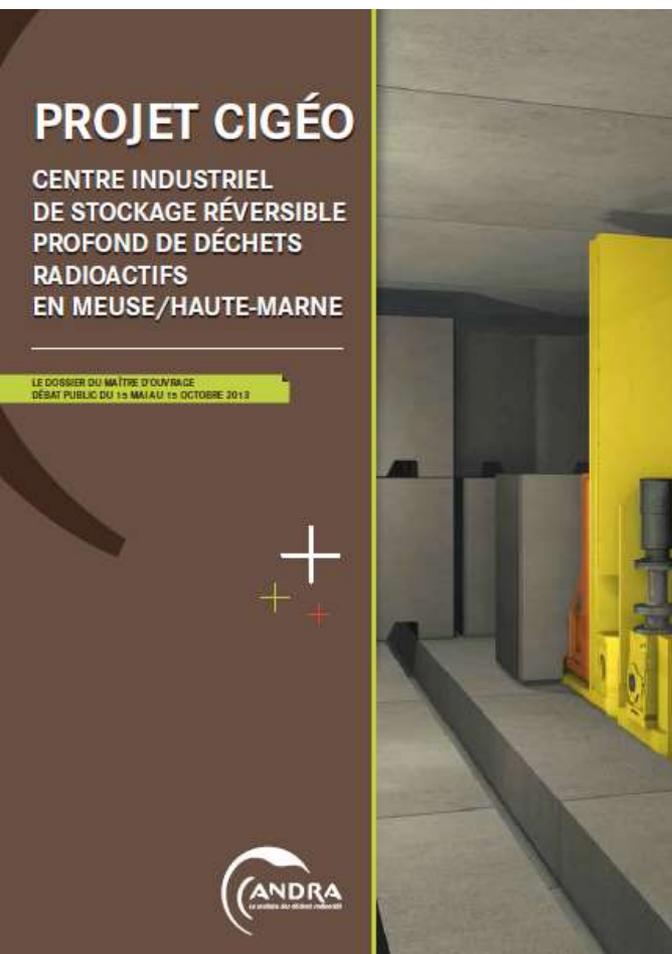
Est-ce sur ?



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



Dose maximale à la surface du au stockage



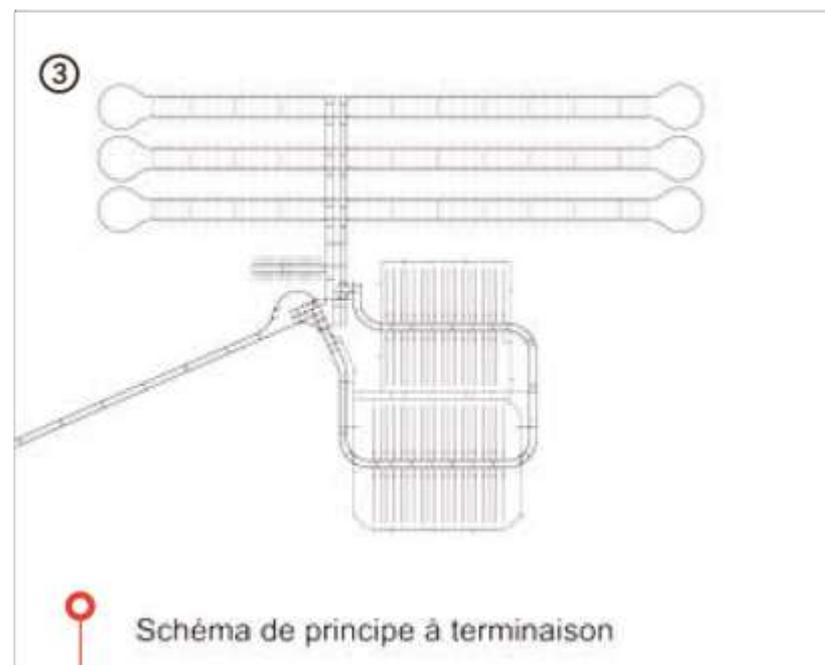
L'inventaire de CIGEO :

	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

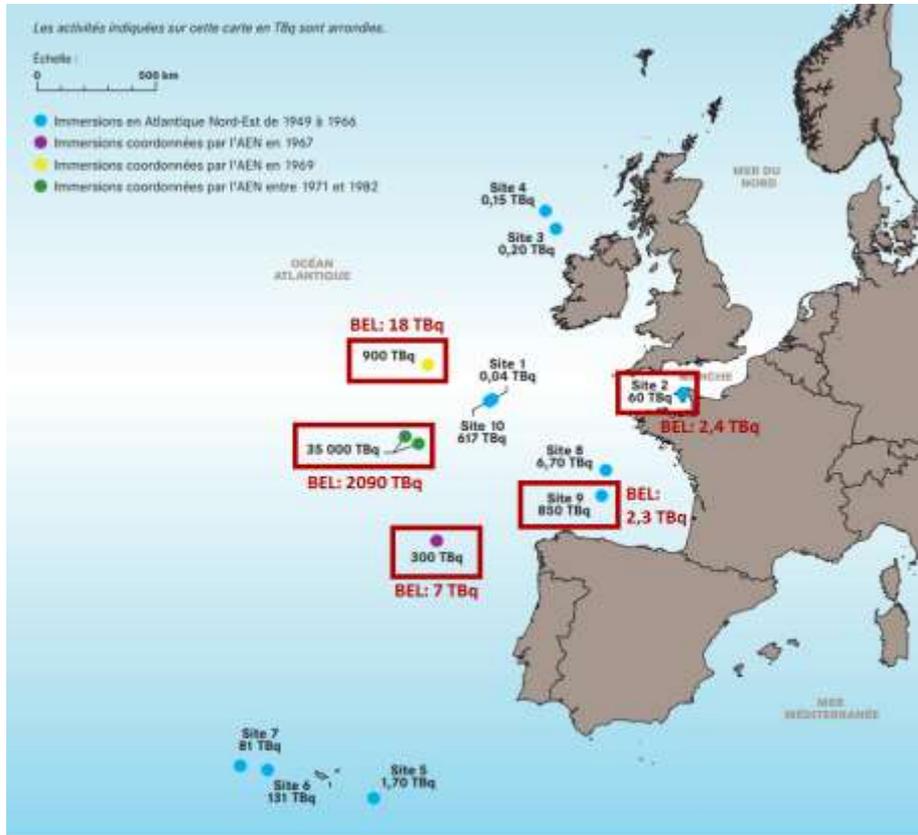


- 5% du total des déchets HA seront installés en 2025 dans CIGEO pour observation pendant 50 ans.
- Le stockage des HA ne débutera donc pas avant 2075 !

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 ?

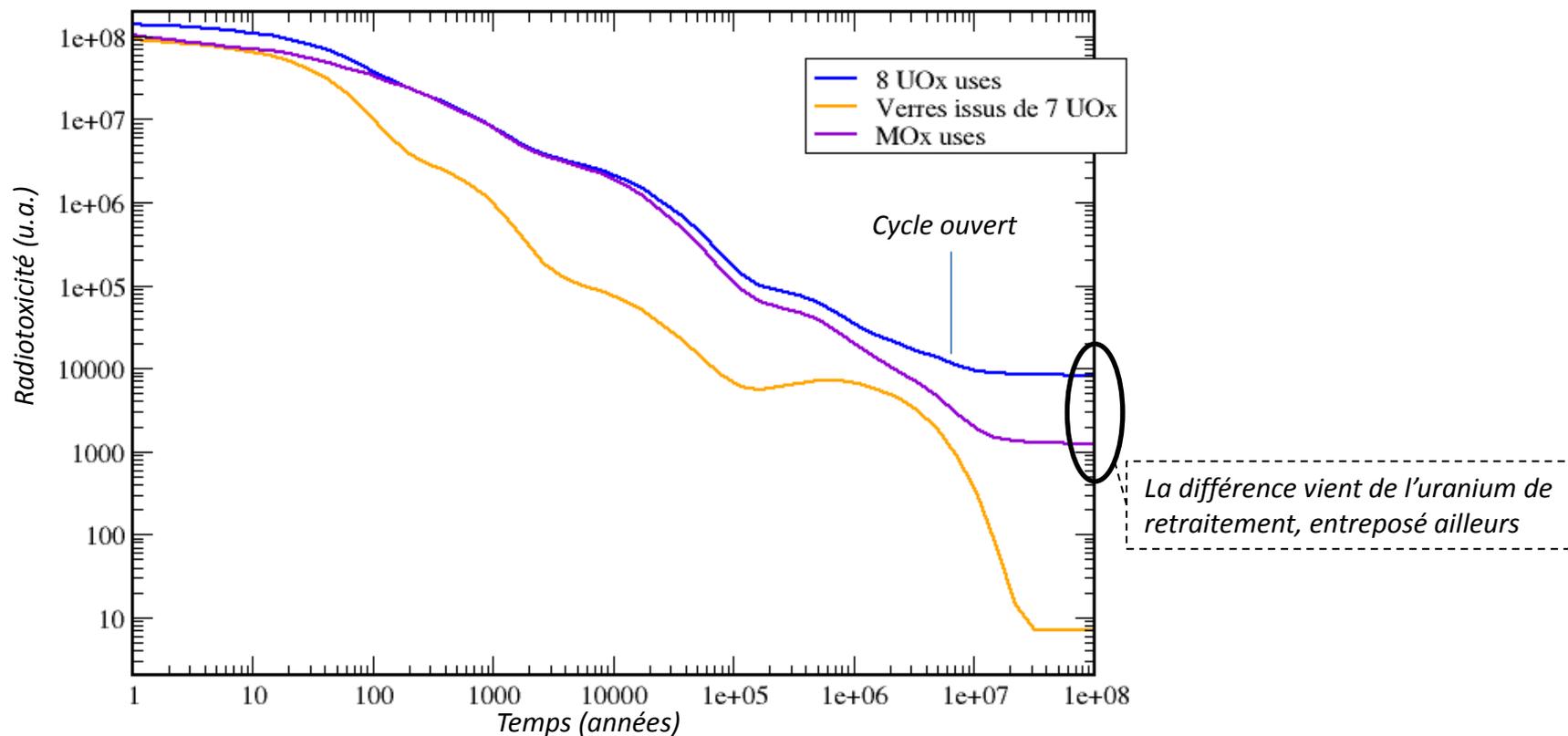
Le plutonium peut être utilisé comme matière fissile pour remplacer l'uranium 235.

→ Utilisation des combustibles Mox pour économiser l'uranium

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

7 Uox usés produisent le plutonium nécessaire pour un assemblage MOx

→ On remplace donc 1 assemblage sur 8 !



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

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

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

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 vendredi ...

Energie nucléaire du futur : Défis et enjeux de la recherche

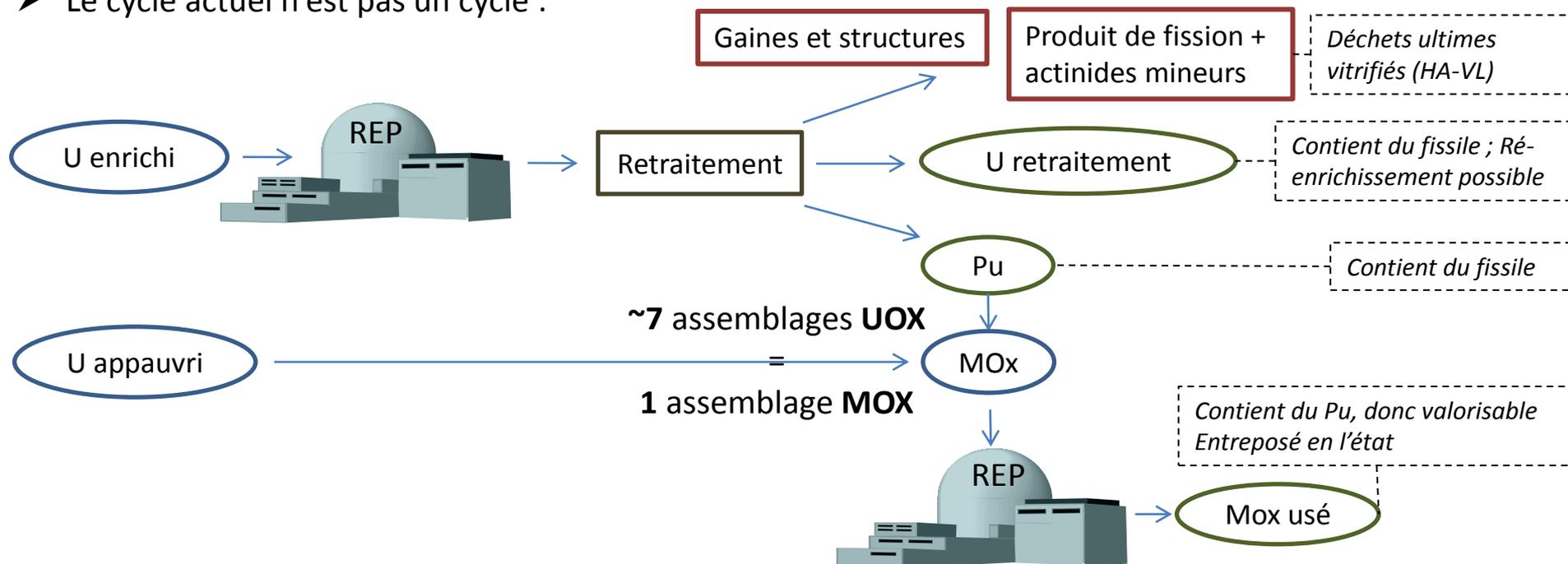
La problématique de l'aval du cycle électronucléaire

De la physique au détecteur
Bénodet, novembre 2017

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

Quelques rappels importants

➤ Le cycle actuel n'est pas un cycle :



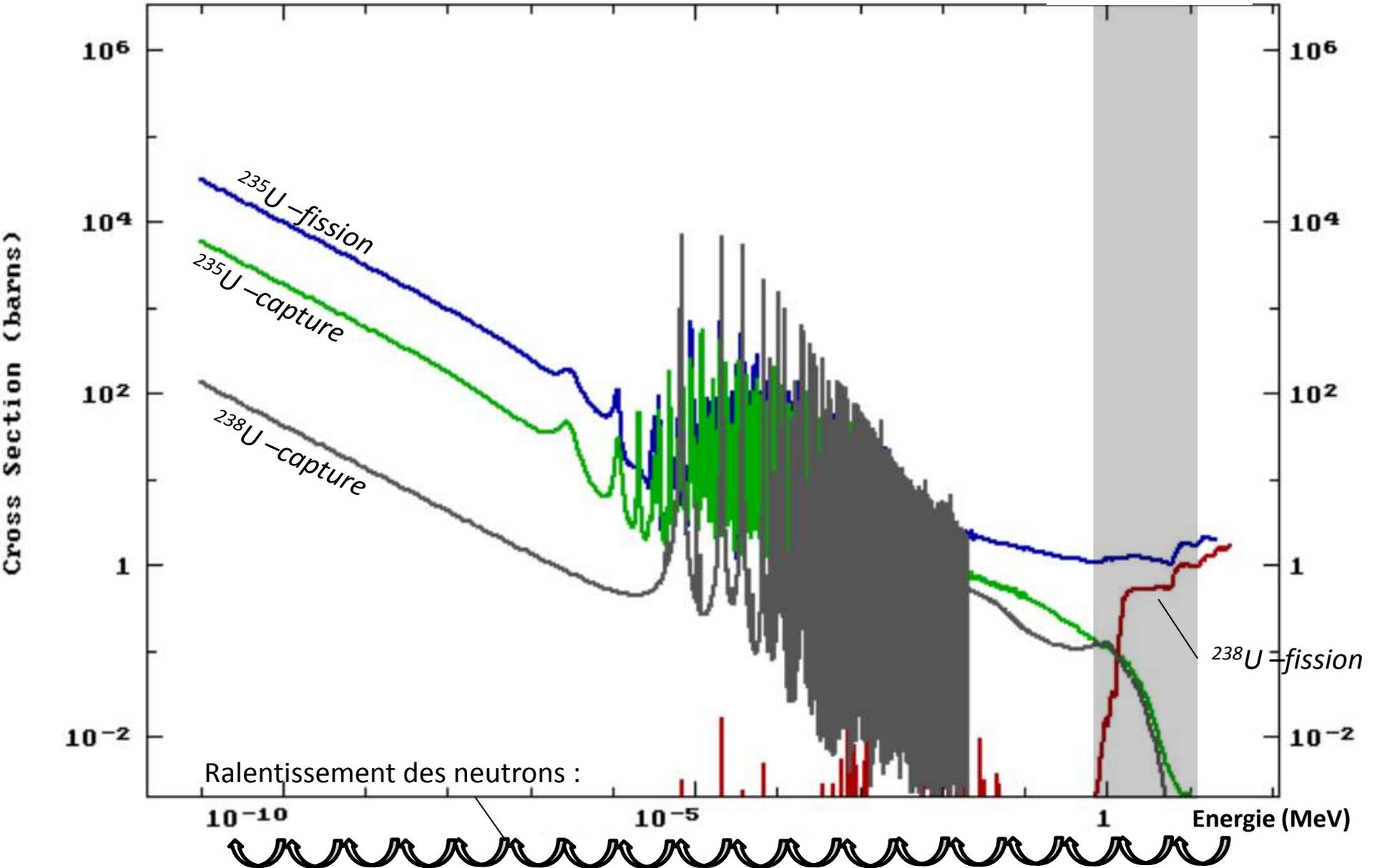
➤ Quelques considérations importantes

- On retrace 80% des UOx environs (environ 10% des assemblages français sont des MOx)
- Déchets nucléaires : « Les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée » loi française (2006)
- Les **MOx usés ne sont pas** considérés comme **des déchets** (car ils contiennent du Pu)

Quelques rappels importants

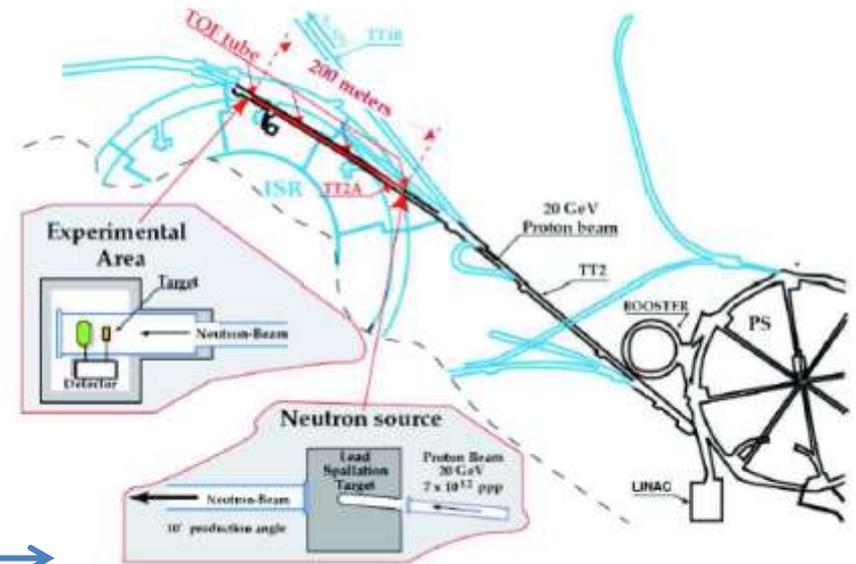
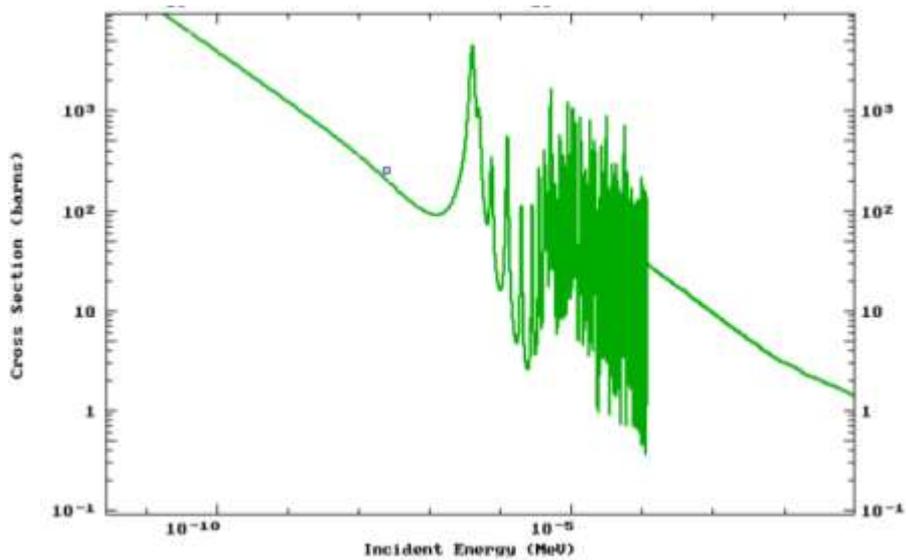
Pour que la criticité soit possible : $N_{238U}\sigma^{capture} < \nu \cdot N_{235U}\sigma^{fission}$

Energie des neutrons émis par la fission

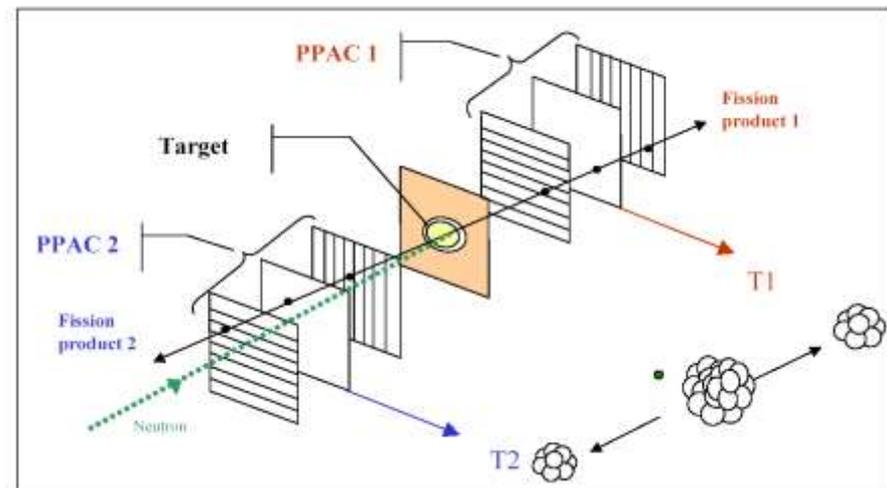


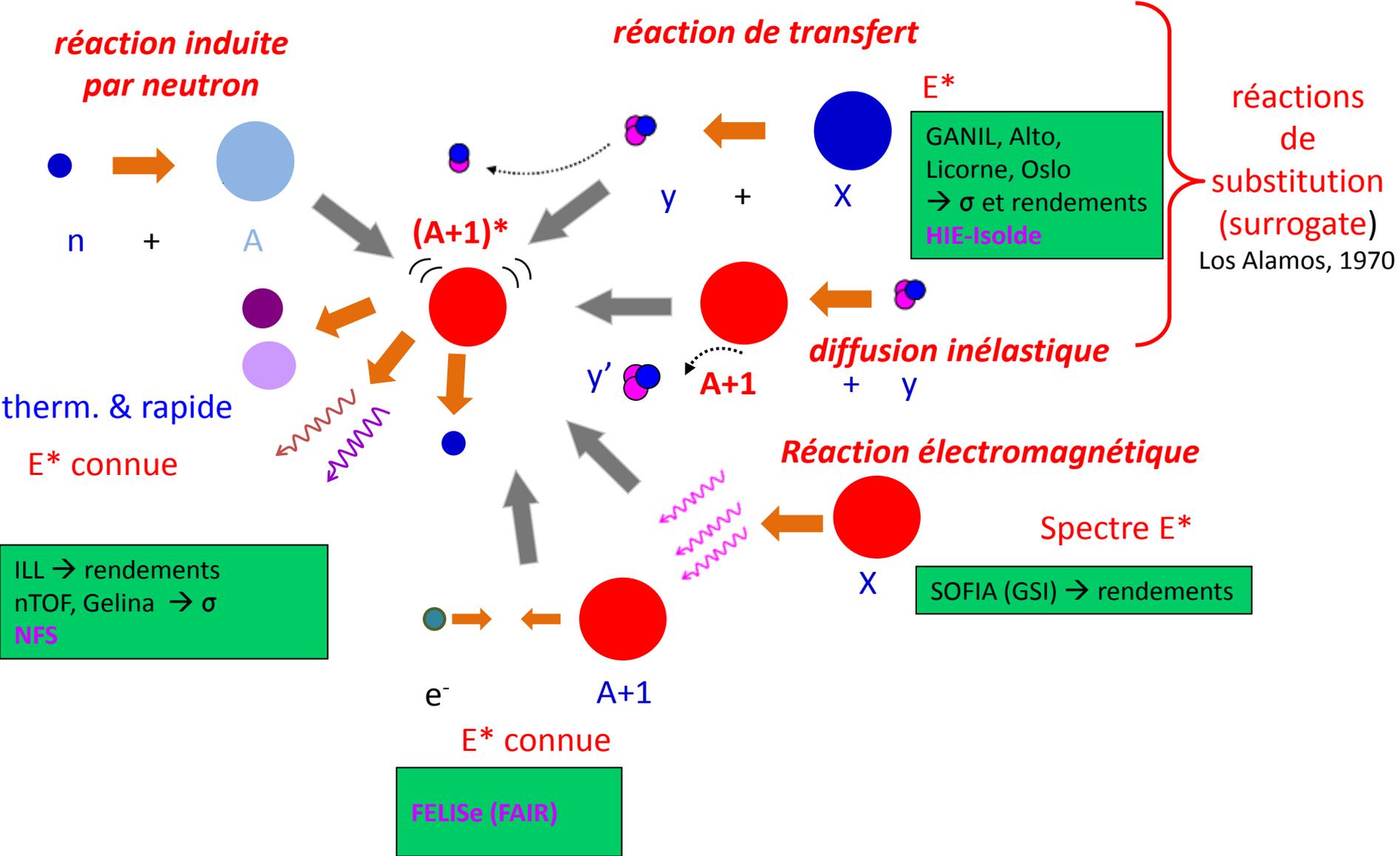
Tout dépend des probabilités d'interaction entre les neutrons et les noyaux !

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

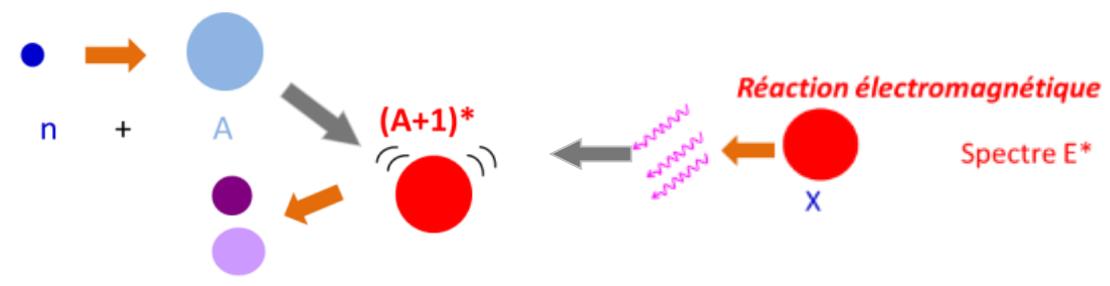


Un exemple à n-ToF



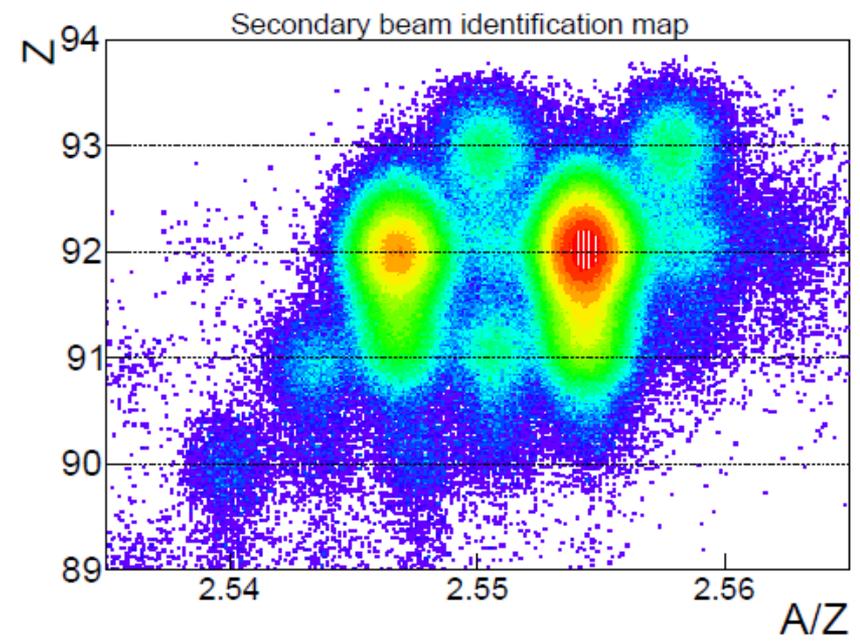
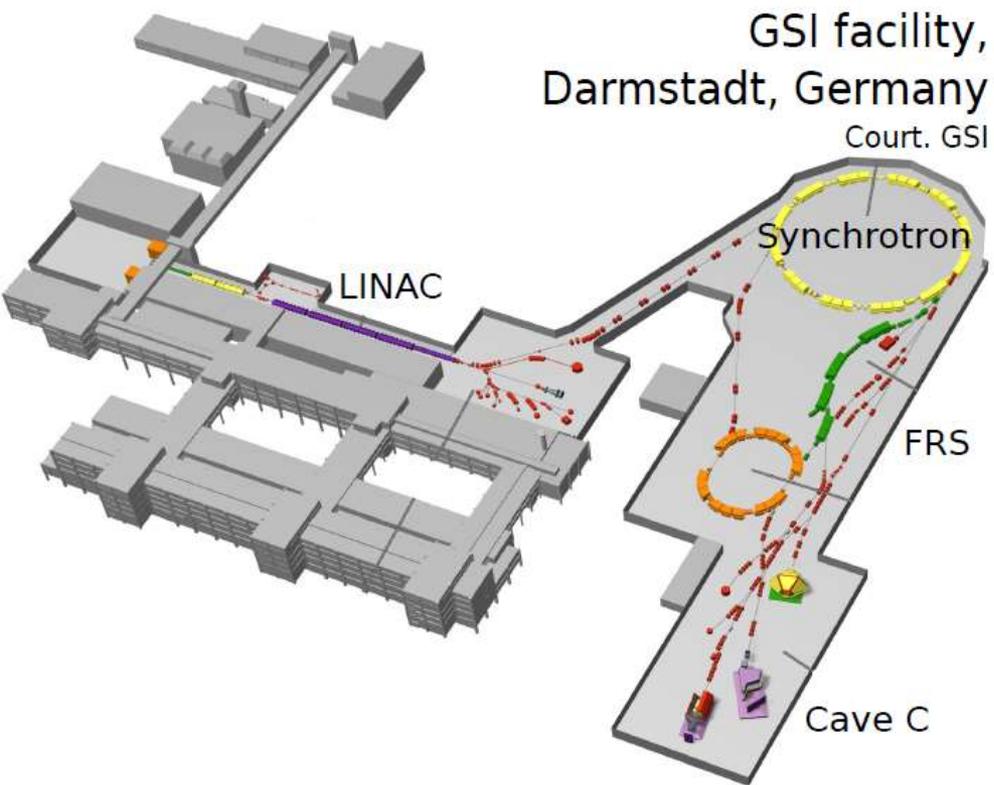


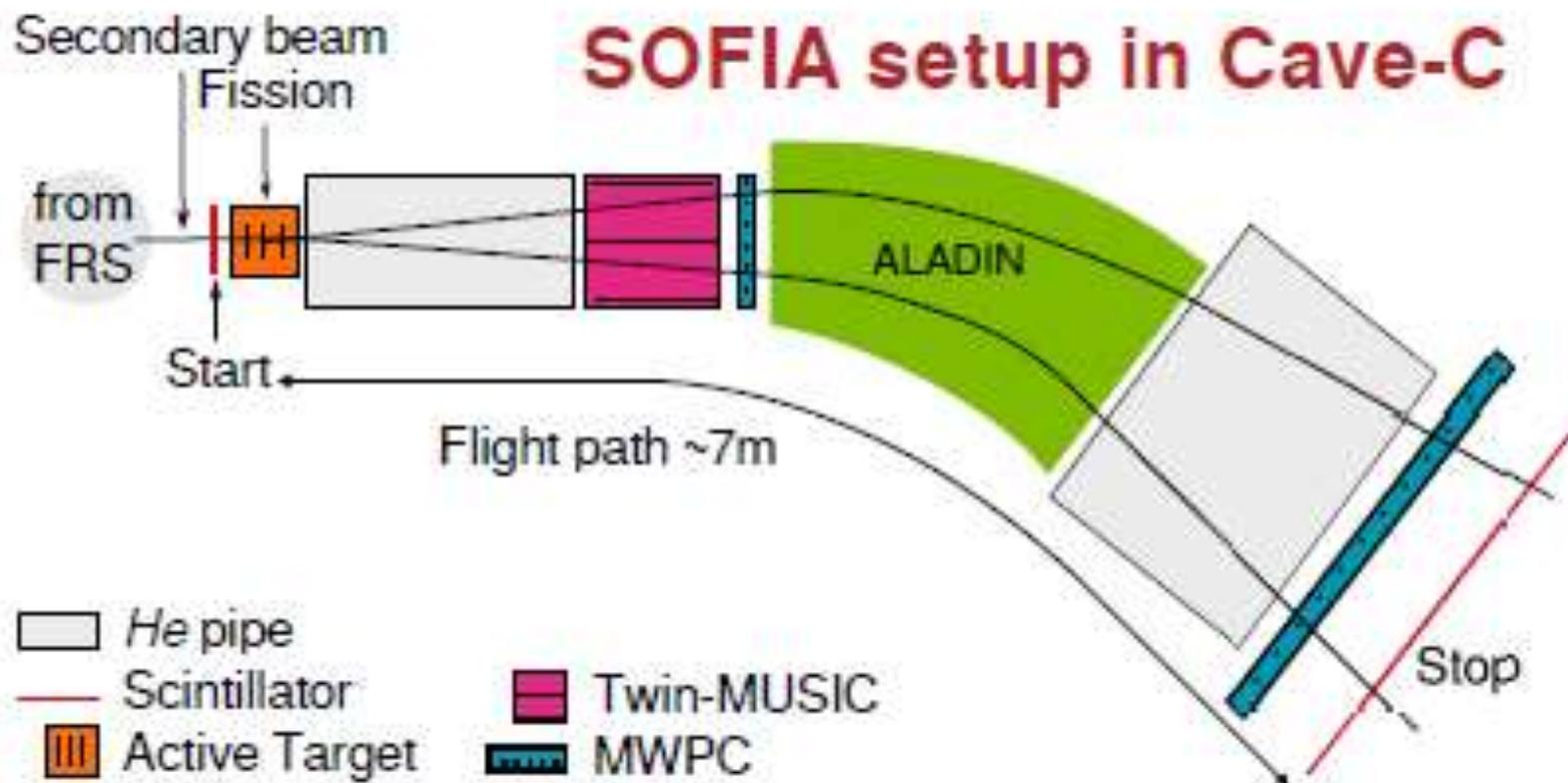
SOFIA: STUDY OF FISSION IN INVERSE KINEMATICS WITH ALADIN @GSI



Fission électromagnétique en cinématique inverse

→ Faisceau d'uranium 238 sur cible de plomb

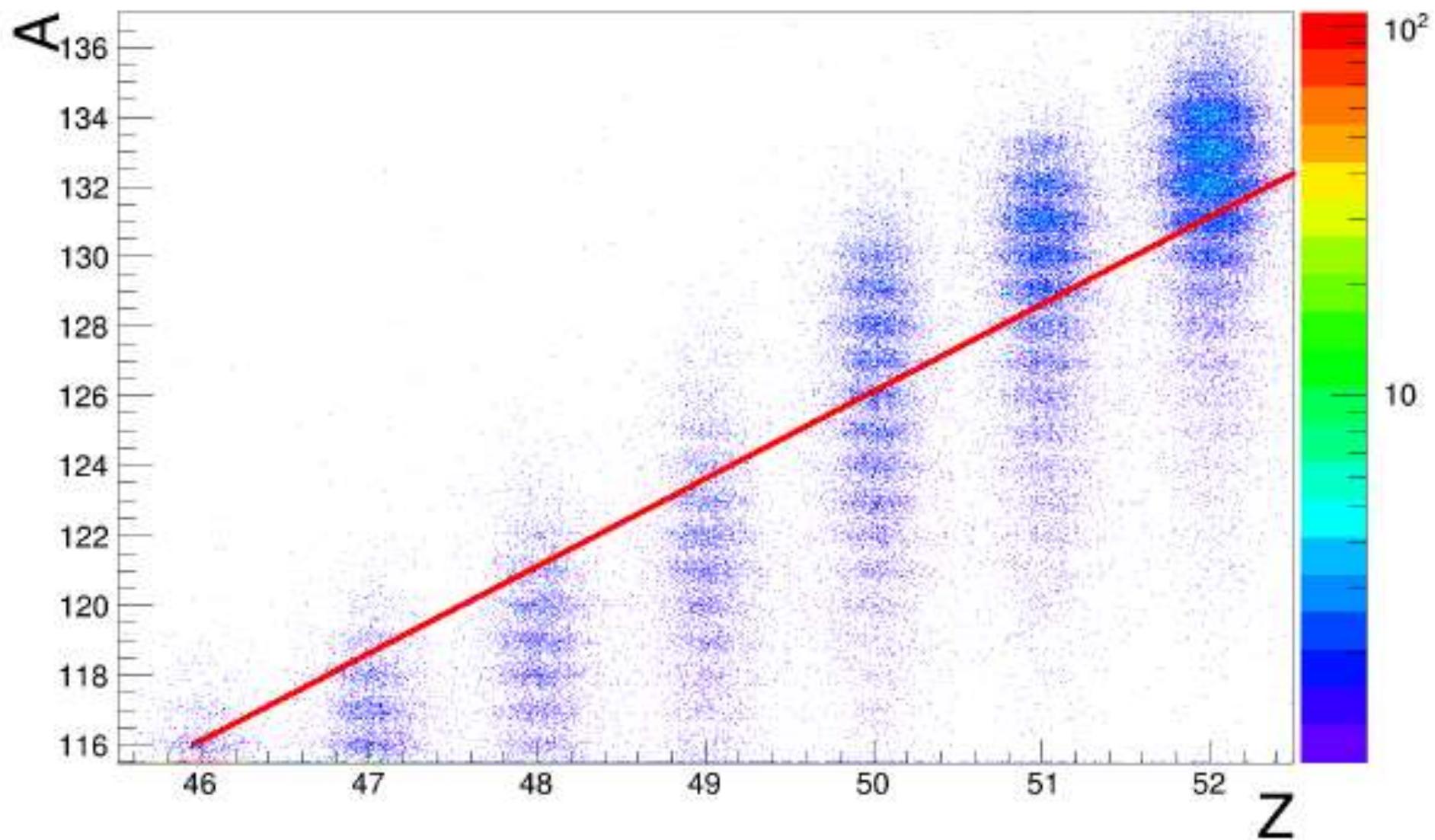




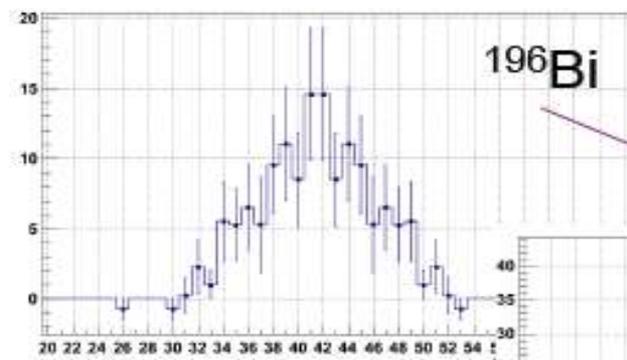
- Twin-Music = Chambre à ionisation (mesure de la charge)
- MWPC (Multi-Wire Proportional Chamber) = Mesure de position pour ($B\rho$)
- ToF = Mesure de la vitesse

→ On mesure la charge et le nombre de masse des deux fragments en même temps !

^{235}U (em, f) - Isotopic yield - Transition from SL to ST1



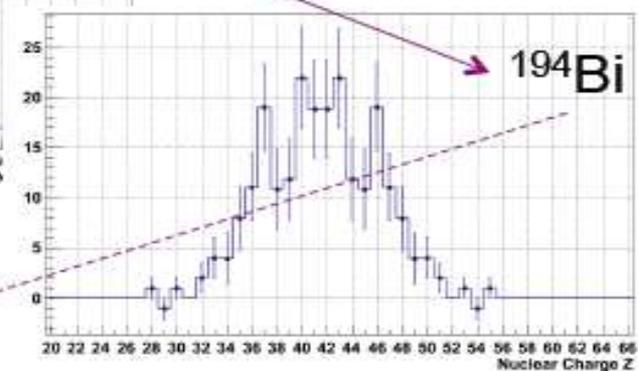
Les données nucléaires... pour la physique nucléaire



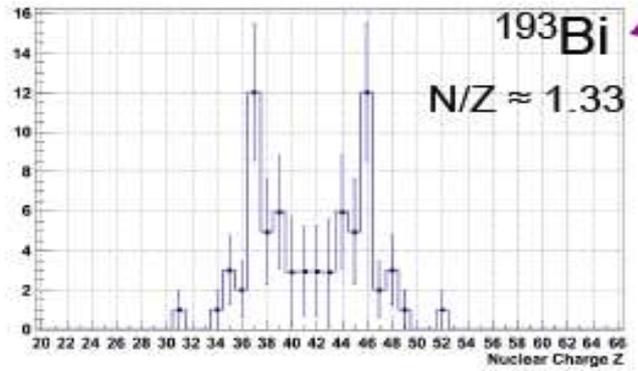
^{196}Bi $N/Z \approx 1.36$



^{195}Bi $N/Z \approx 1.35$



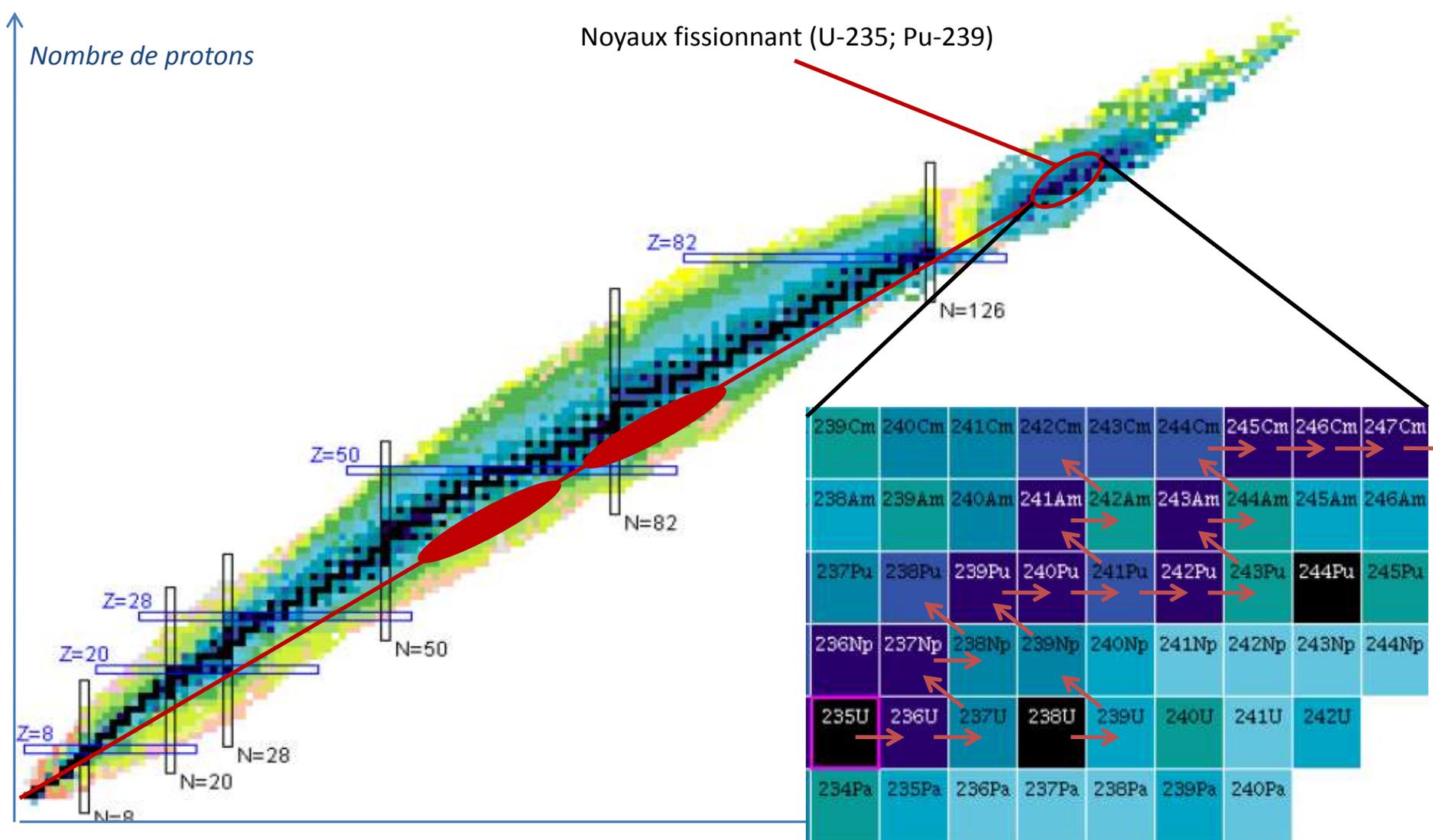
^{194}Bi $N/Z \approx 1.34$



^{193}Bi
 $N/Z \approx 1.33$

Bismuth isotopes (40 - 60 fissions)
first observation in this mass region of
transition from symmetry to asymmetry

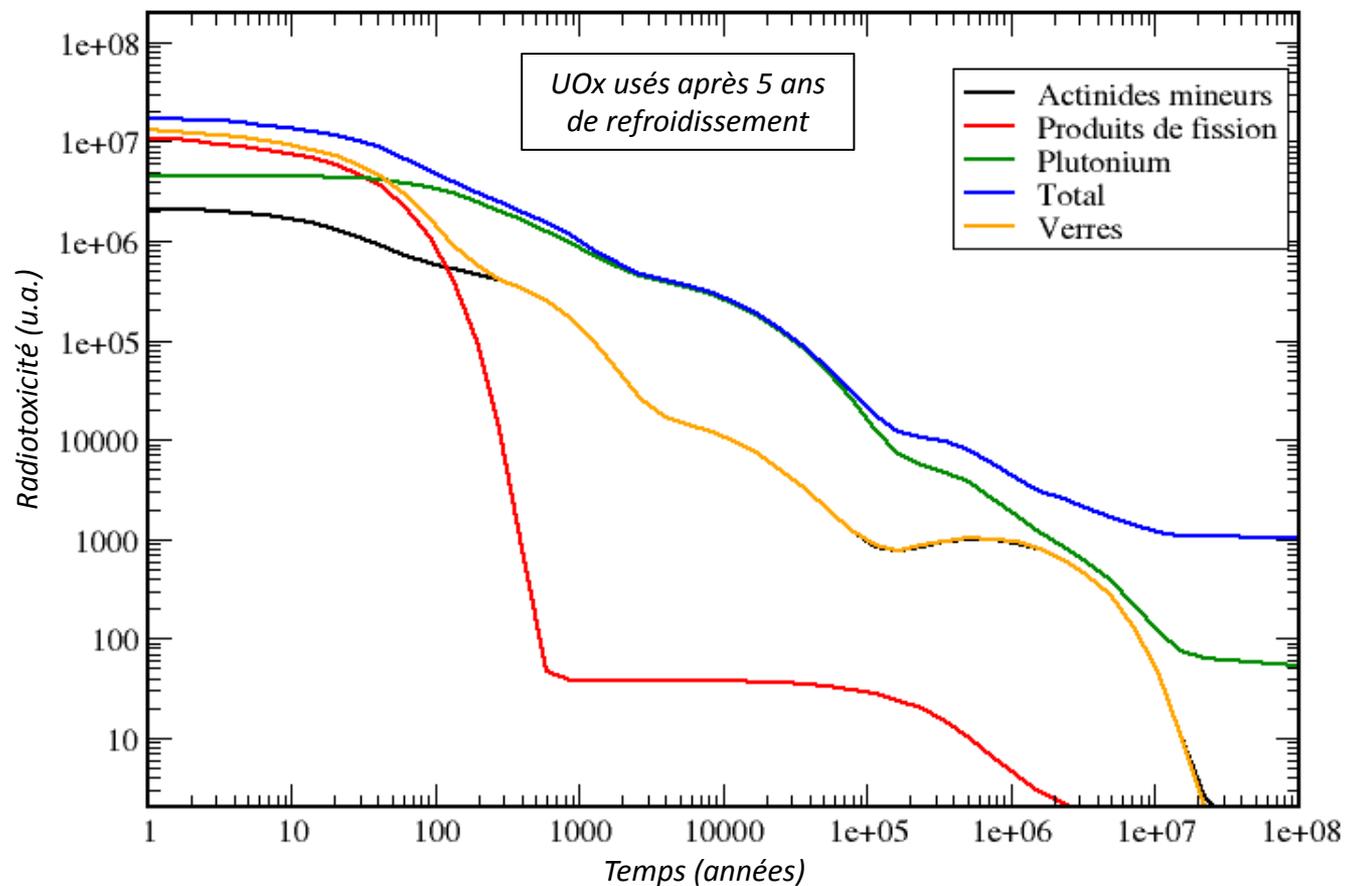
Quelques rappels importants



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 10⁶ 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

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 ?

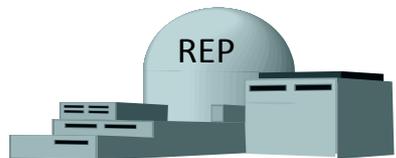
Conclusions

Des ordres de grandeurs qui compliquent le débat

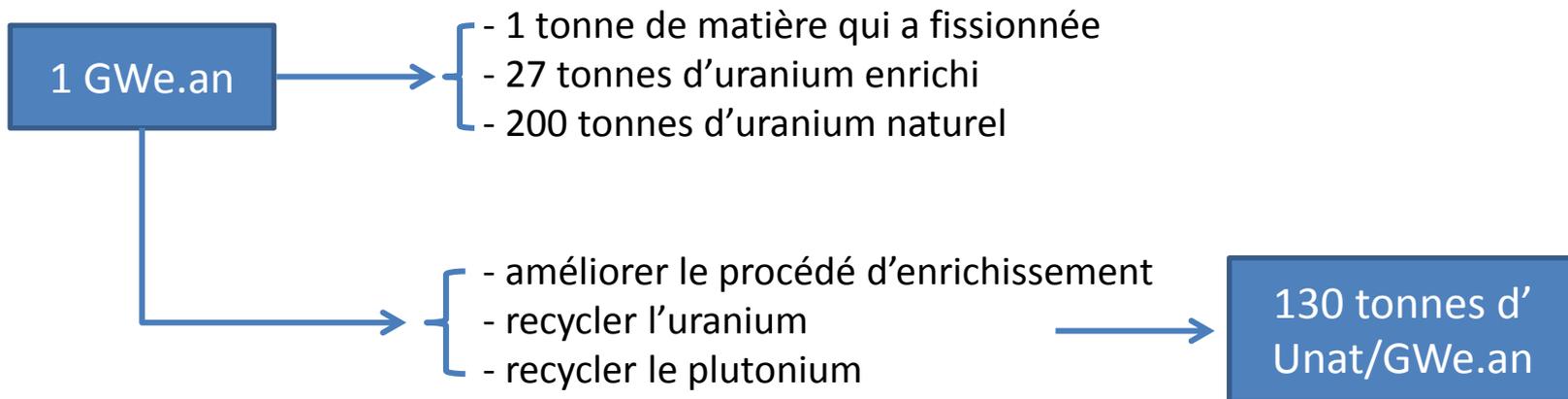
Les projets de réacteurs européens

La place du CNRS/IN2P3 dans le débat

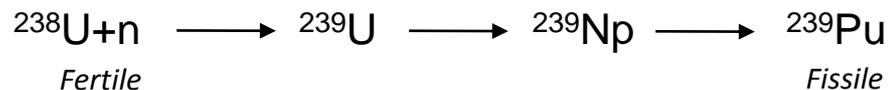
La valorisation du plutonium



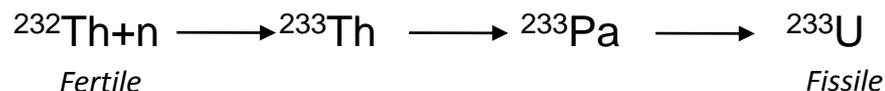
Basé sur l'utilisation de l' ^{235}U (0,7% de l'uranium naturel)



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



Cycle thorium

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

La régénération

Bilan neutronique :

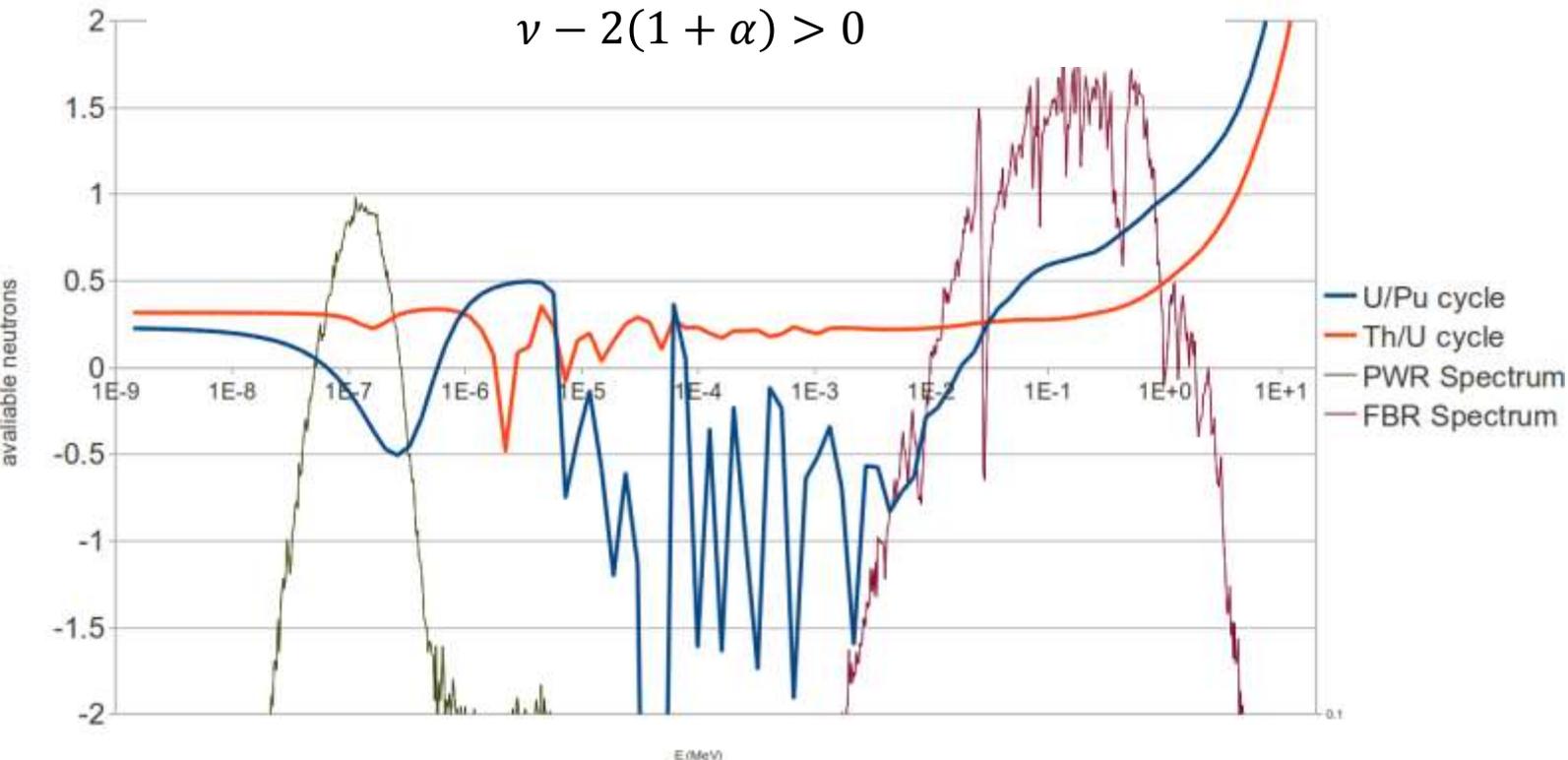
Production de neutrons Par fission	Besoin de neutrons
ν neutrons produits par fission	1 neutron pour la fission + α neutron pour la capture sur le fissile + $1 + \alpha$ neutrons sur le fertile

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

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

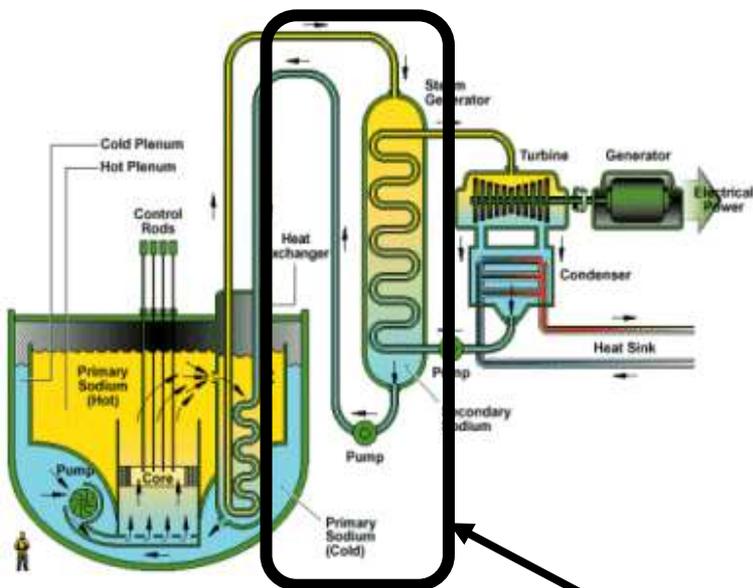
Il faut produire $1 + \alpha$ noyau fissile

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

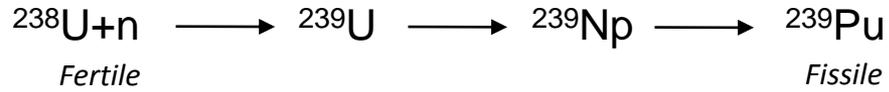
- Nécessite un échangeur supplémentaire pour les générateurs de vapeurs

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

Augmentation des coûts de constructions

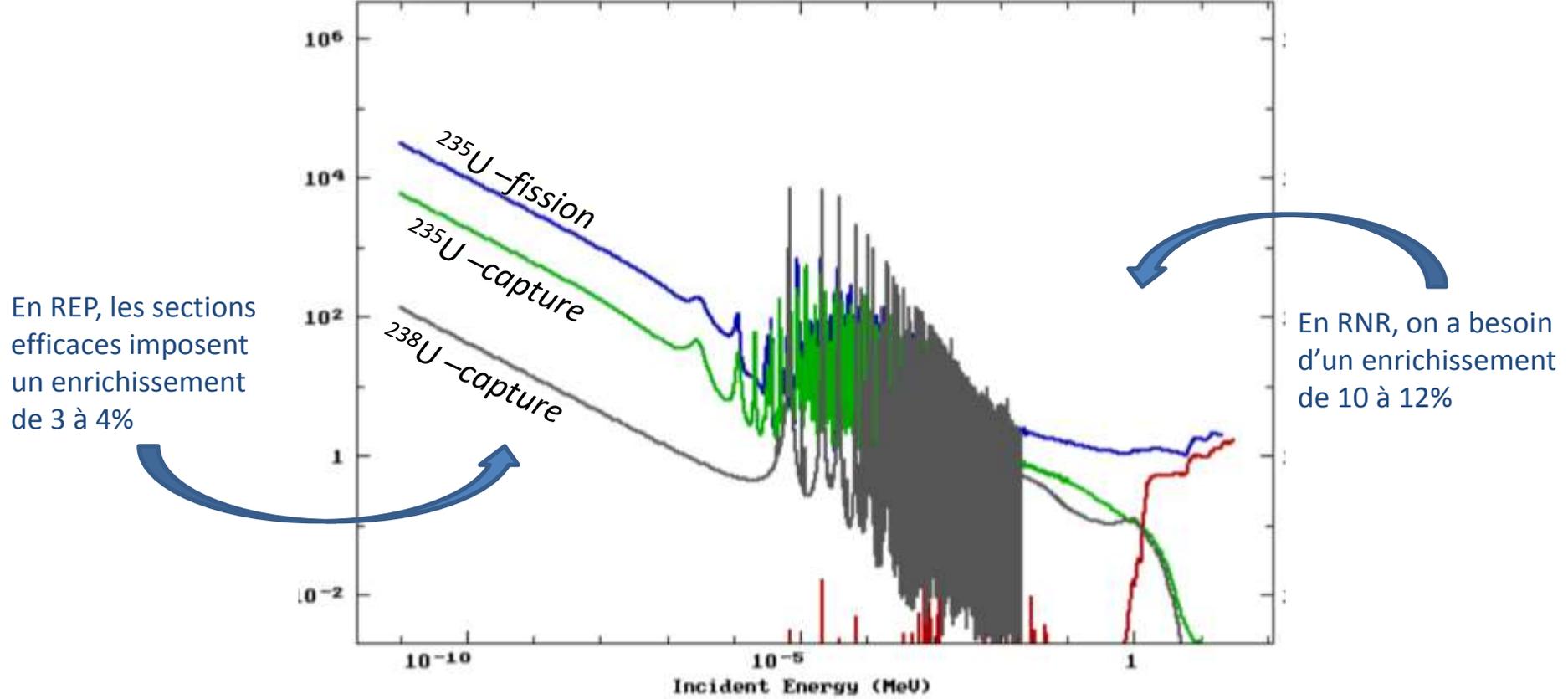
La France a plus d'expérience dans le démantèlement des réacteurs aux sodiums de 1200 MW_e que dans les REP actuel

La problématique de l'inventaire initial



Les **réacteurs à neutrons rapides** ont besoin de **plutonium** pour **démarrer**
→ Ensuite ils ne consomment plus que de l'uranium minéral
en France on a 200 000 t d'Uapp disponible

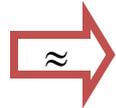
Les RNR ne valorisent pas l'U-238



Inventaire initial d'un RNR Sodium

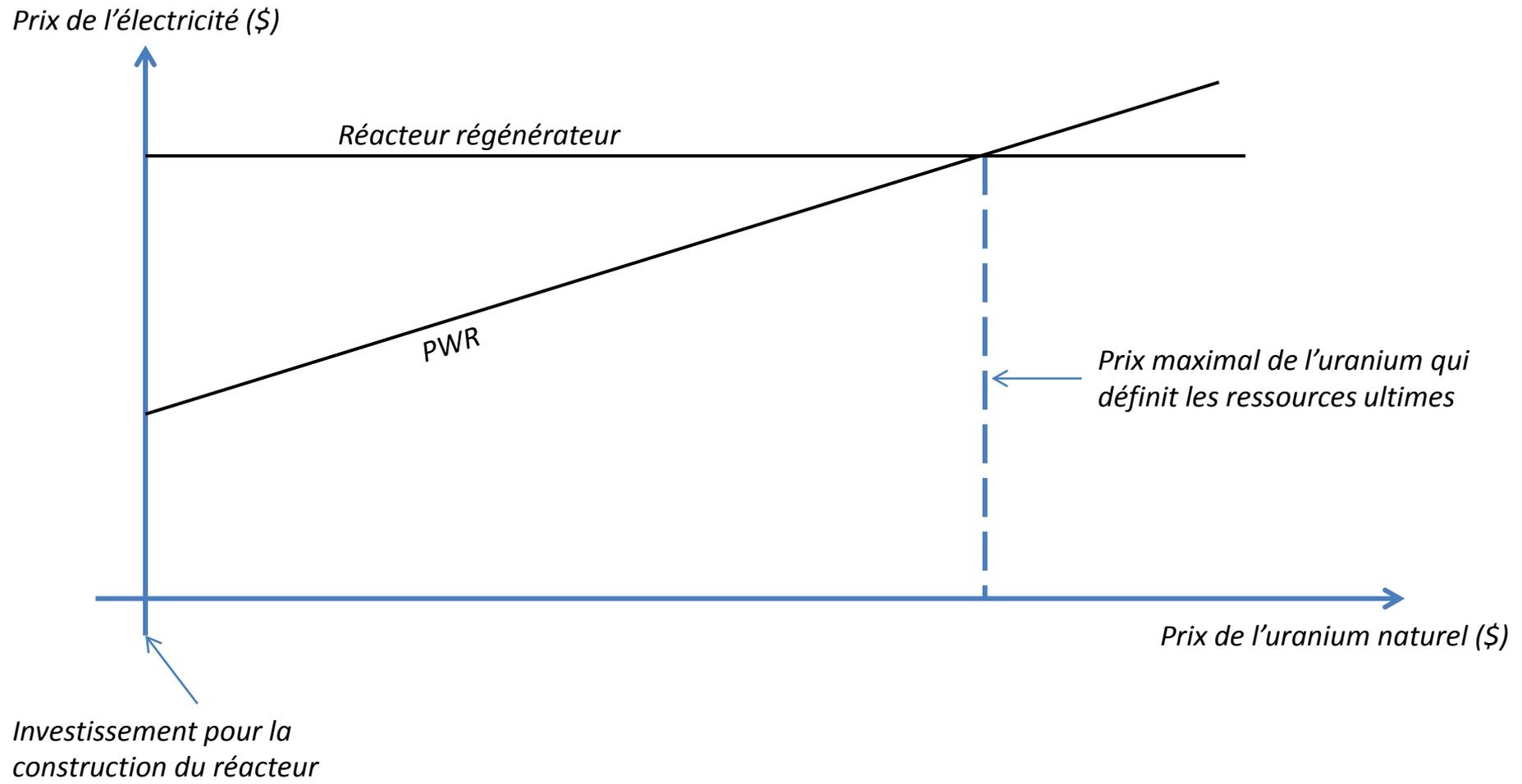


12 t de Pu

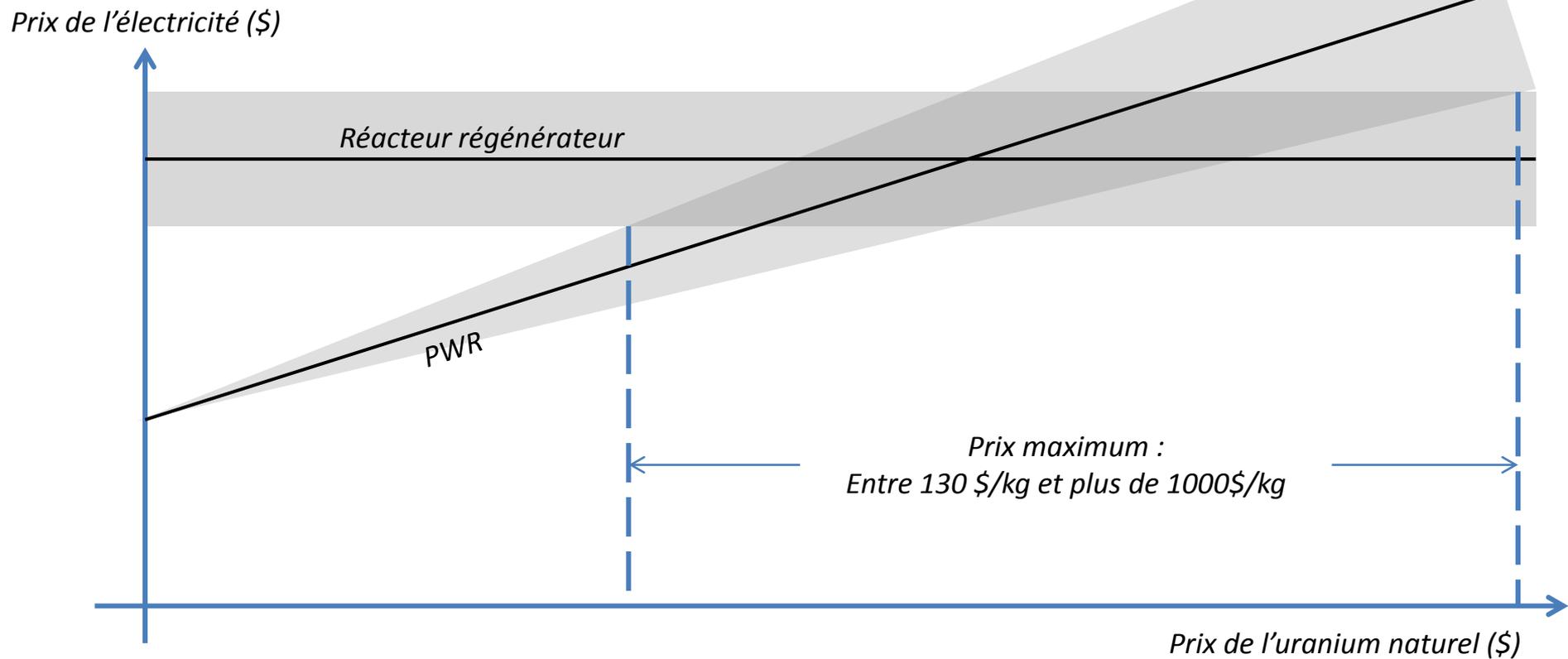


Un REP produit en 50 ans

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

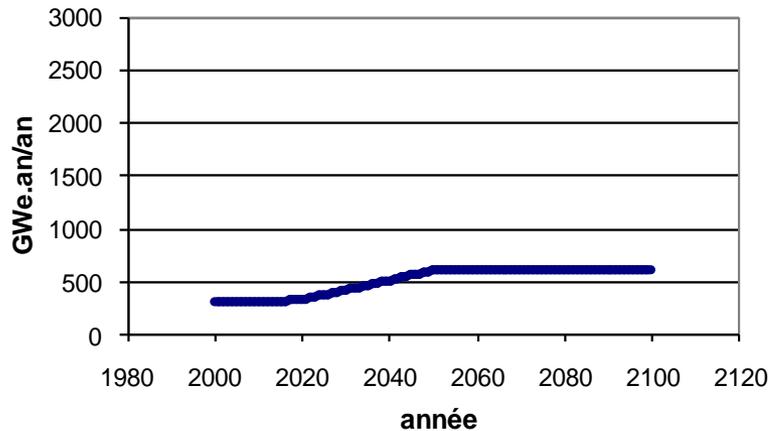
AIEA 16

Extrapolation linéaire « reserves vs. prix » à 400\$/kg (ref JF. Luciani, CEA) 23

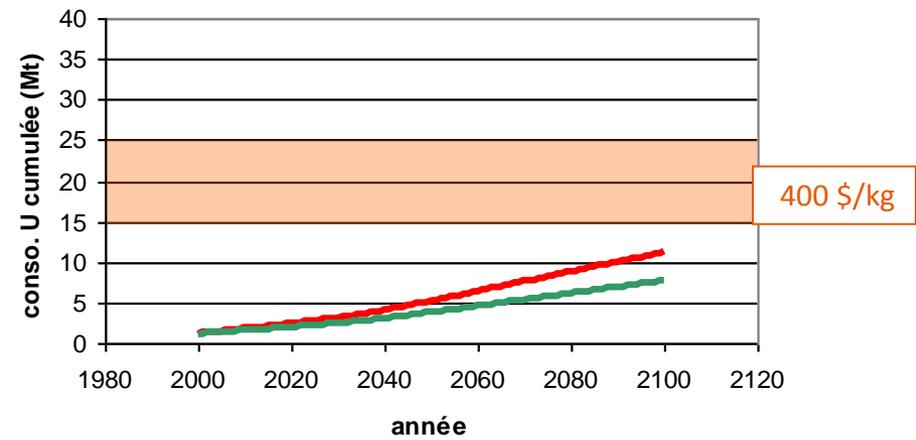
➤ Aujourd'hui:

- 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



— 200t/(GWe.an)
— 130t/(GWe.an)

La nécessité de voir en amont



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

La situation en **2012** :

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

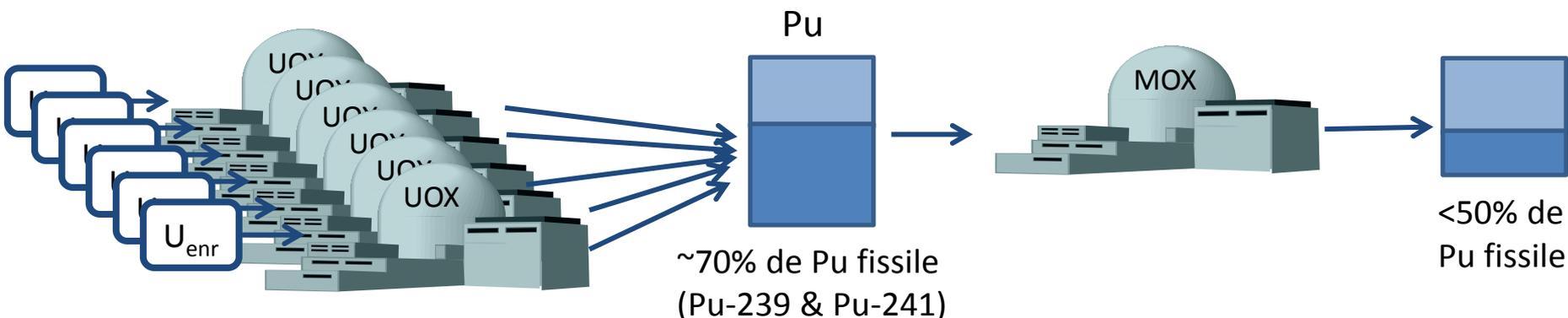
Si on a besoin rapidement des RNR (avant 2100), il faut économiser le plutonium

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

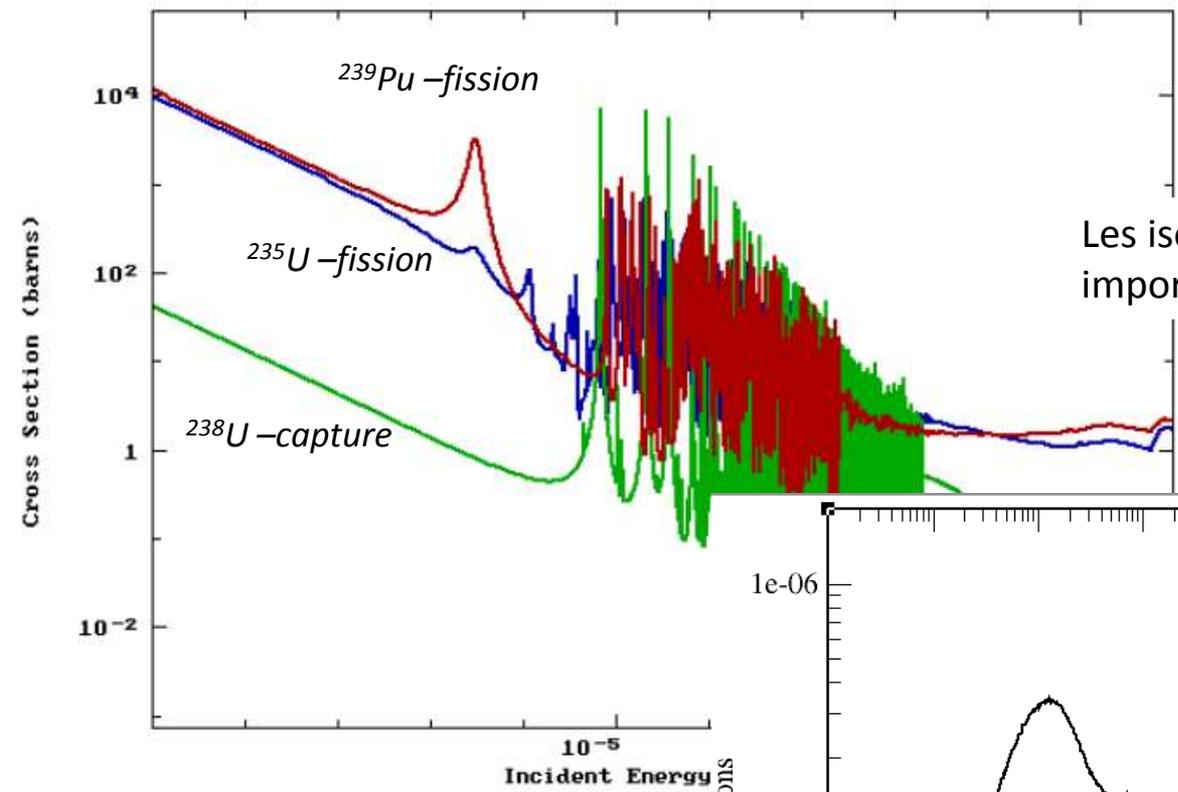
Le recyclage permet de concentrer le Pu dans les Mox usés, en vue de faciliter le recyclage plus tard

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

→ *Maintien des compétences industrielles*

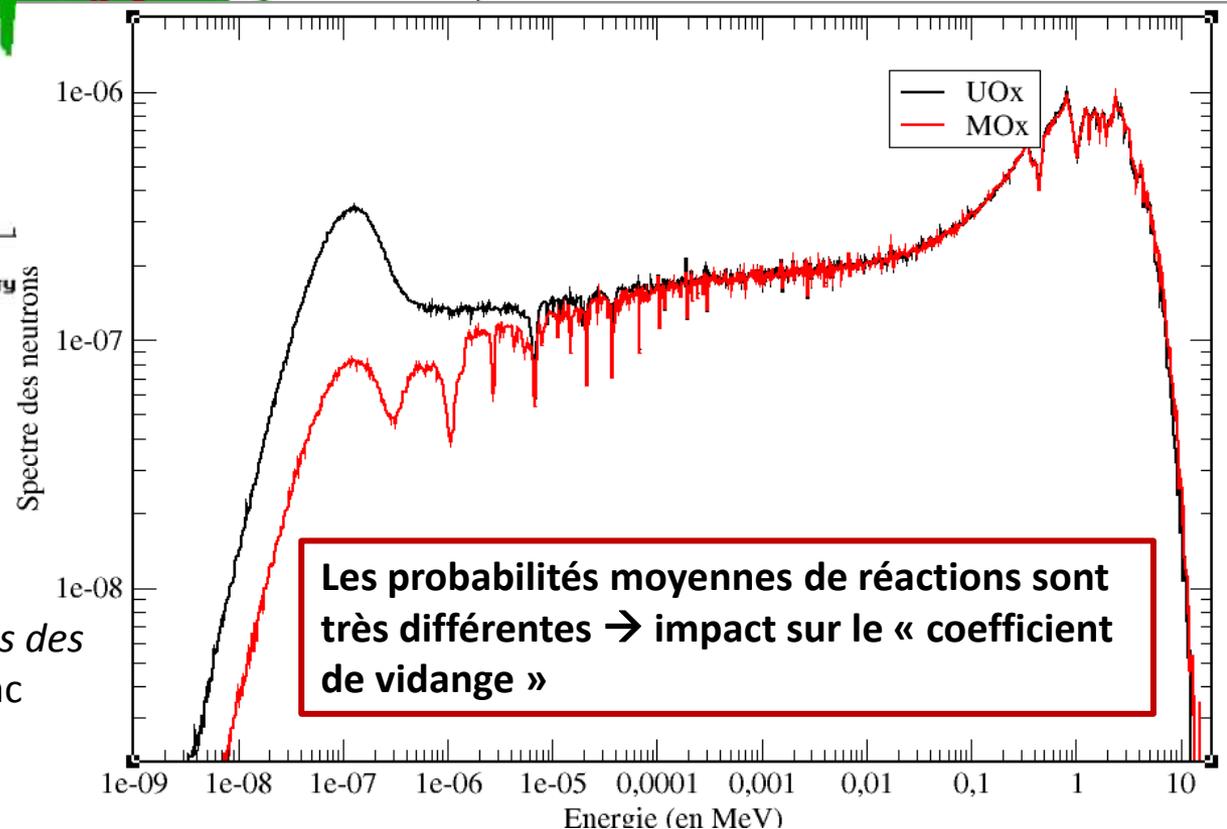


L'impact du MOX dans les REP



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

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



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

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

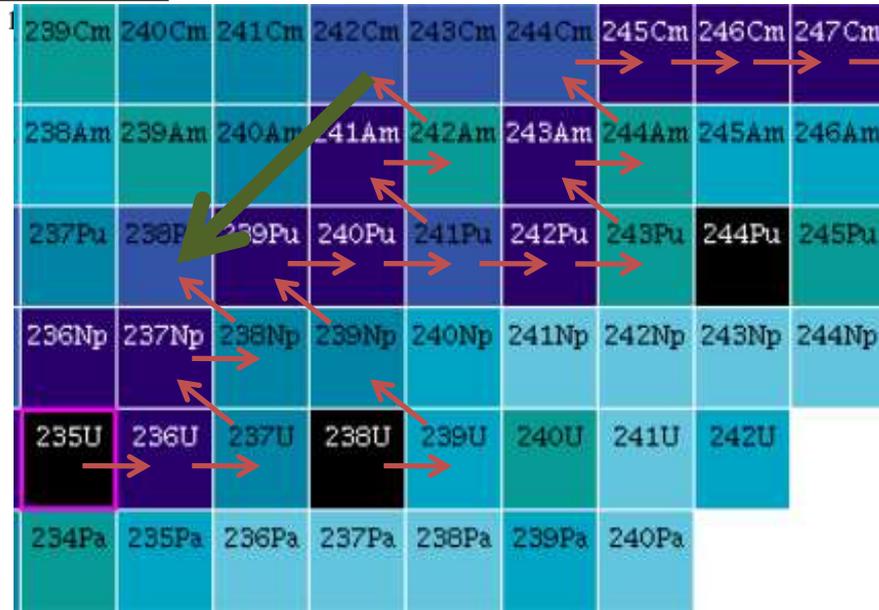
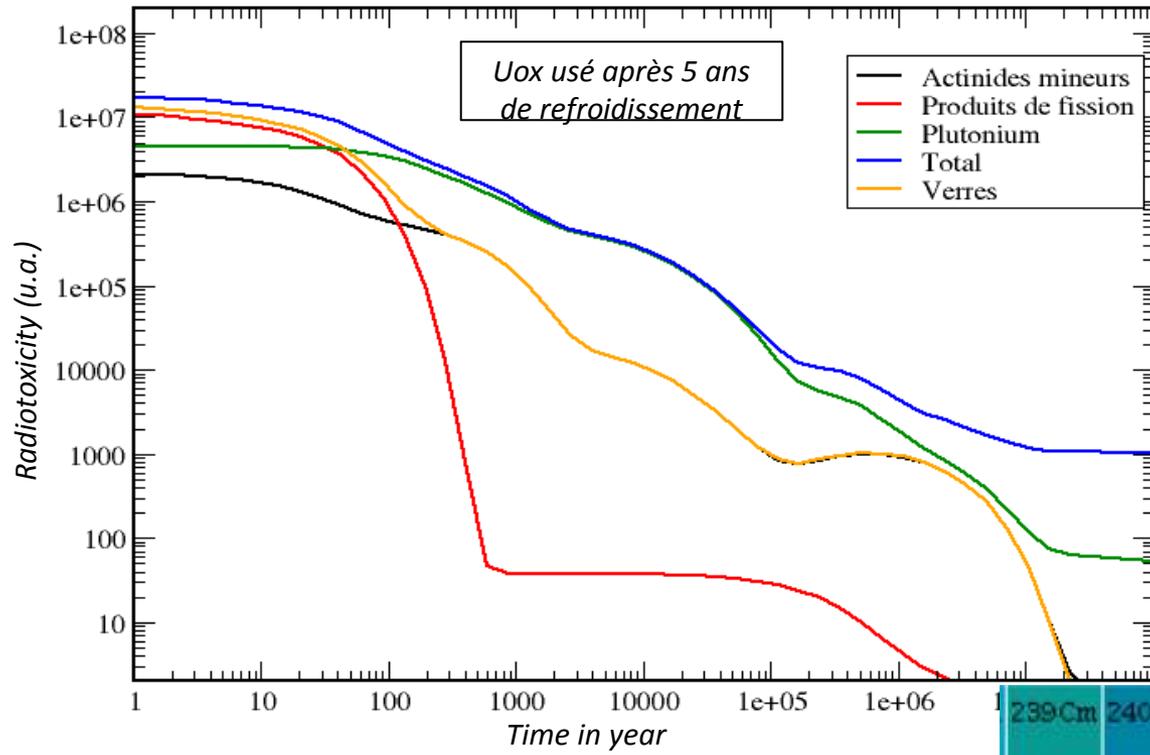
4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

Qu'est ce que c'est ?

Un choix pour le futur et donc un non-choix ?

Conclusions

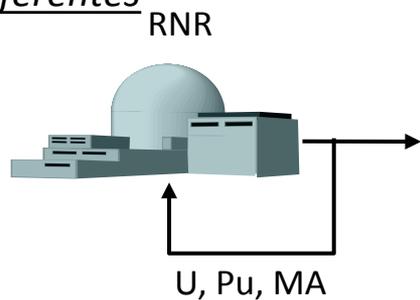
La transmutation : qu'est ce que c'est ?



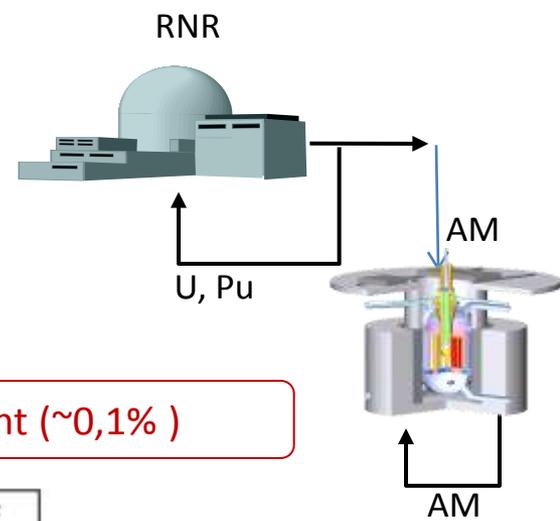
Transmutation des actinides mineurs

Deux stratégies différentes

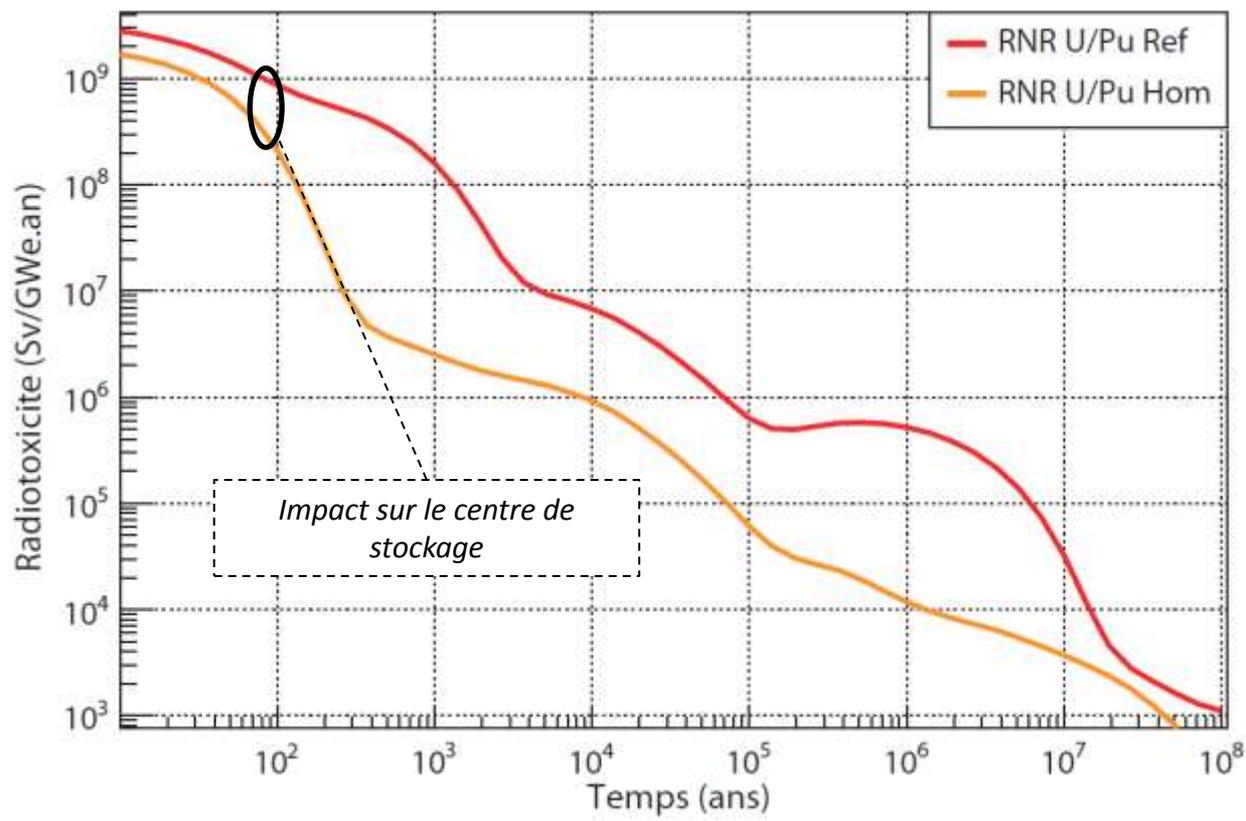
➤ Dans RNR



➤ ADS → scénario double strate

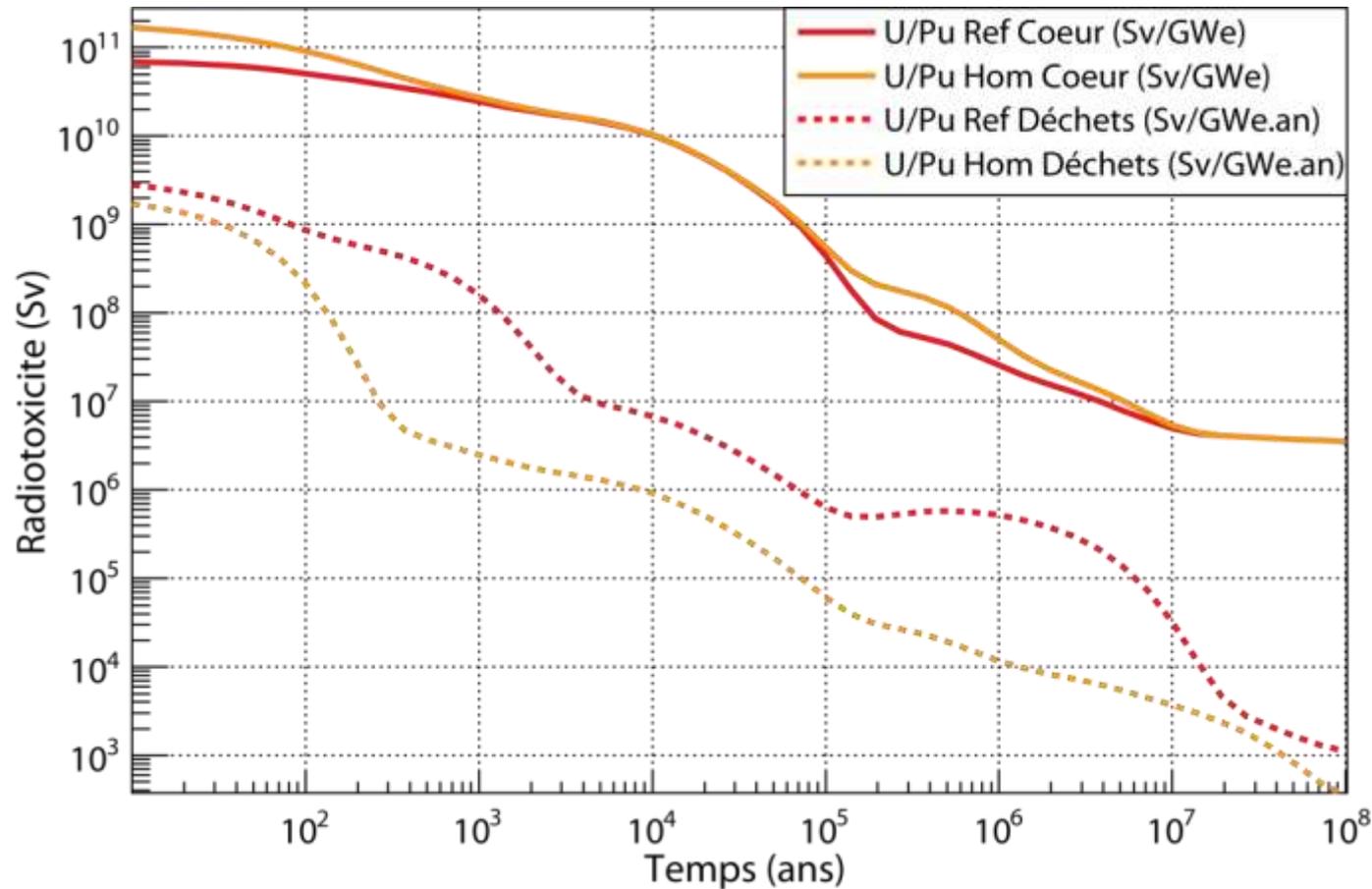


Déchets ↔ PF + pertes chimiques au retraitement (~0,1%)



- 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 contenue 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



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 :

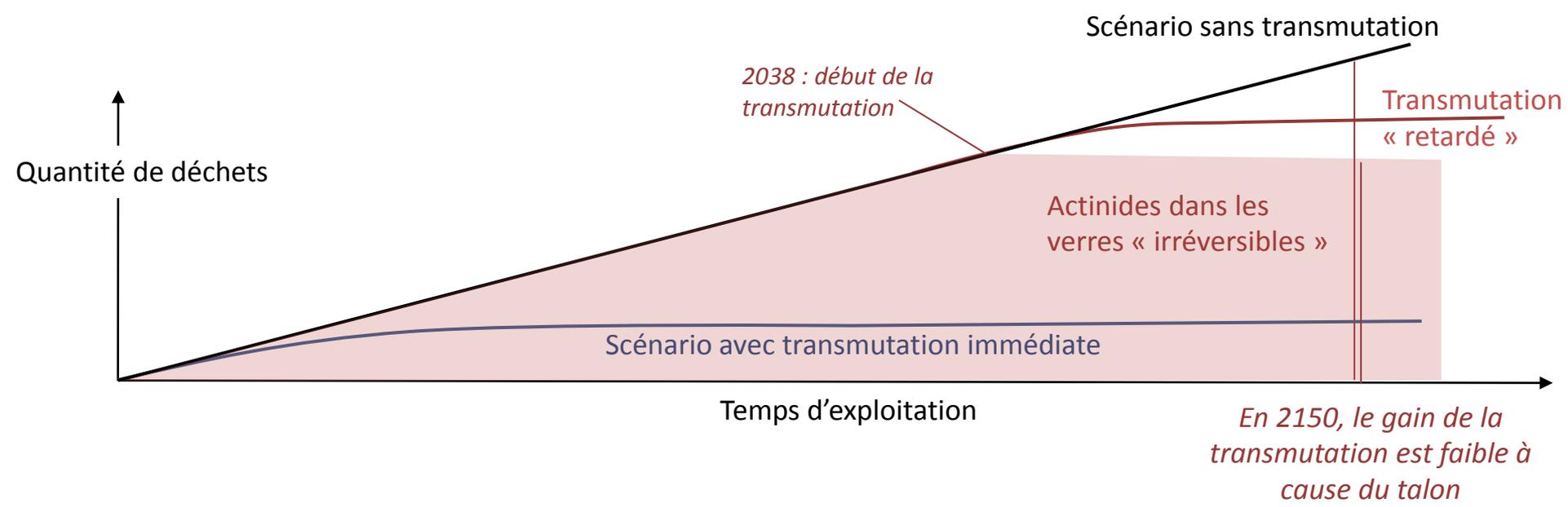
	Confiance dans la société	Oui	Non
Promoteur-nucléaire	Pour un développement durable du nucléaire	X	
	Pour la transmutation		X
« Anti-nucléaire »	Pour un développement durable du nucléaire		X
	Pour la transmutation et/ou entroposage	X	

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

$$\frac{dN}{dt} = \text{Production} - \text{Disparition} \rightarrow N(t) = \frac{P}{\sigma_a \phi} (1 - e^{-\sigma_a \phi t})$$

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

Apport de la transmutation



- 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?

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 ?

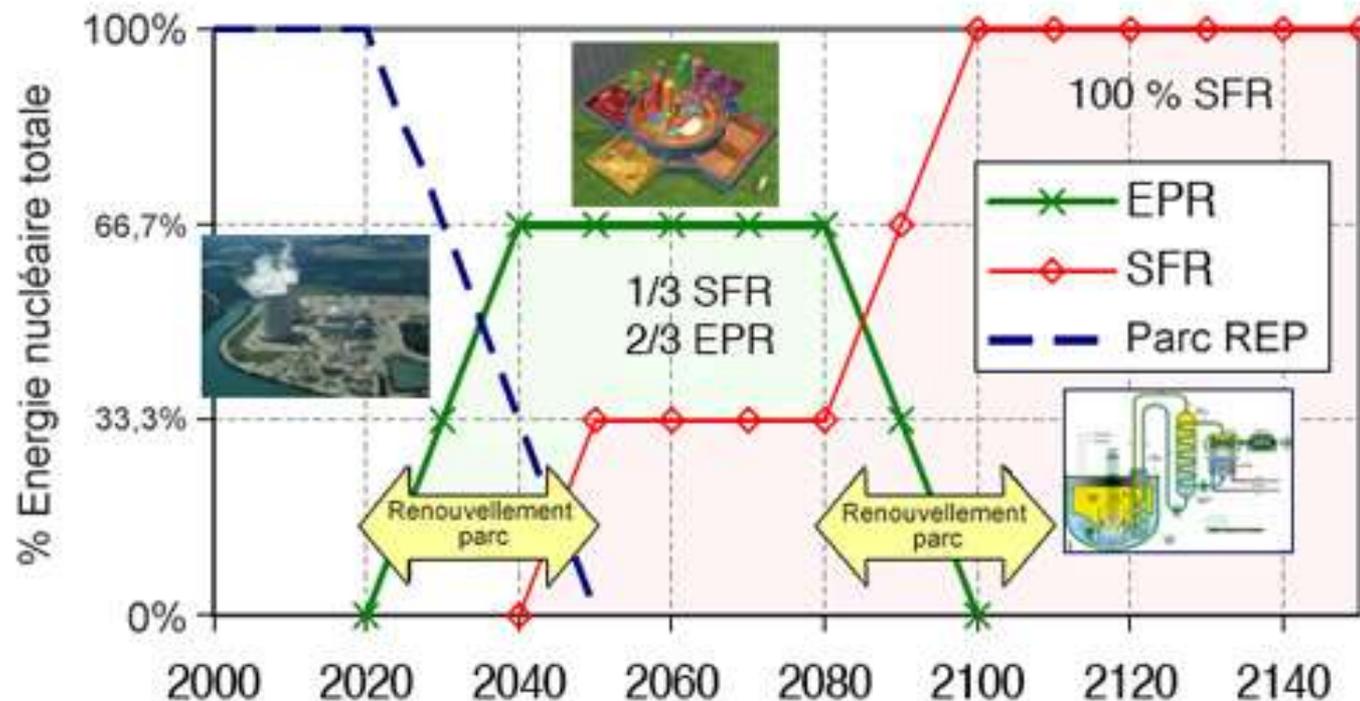
L'importance des scénarios pour les décisions

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)

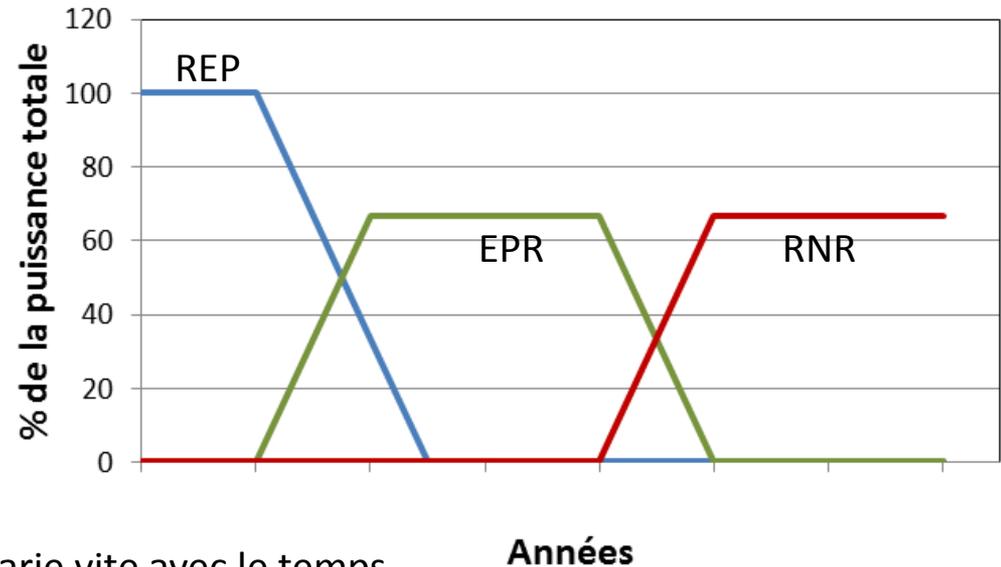
➤ Différents critères de comparaison

- 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)*

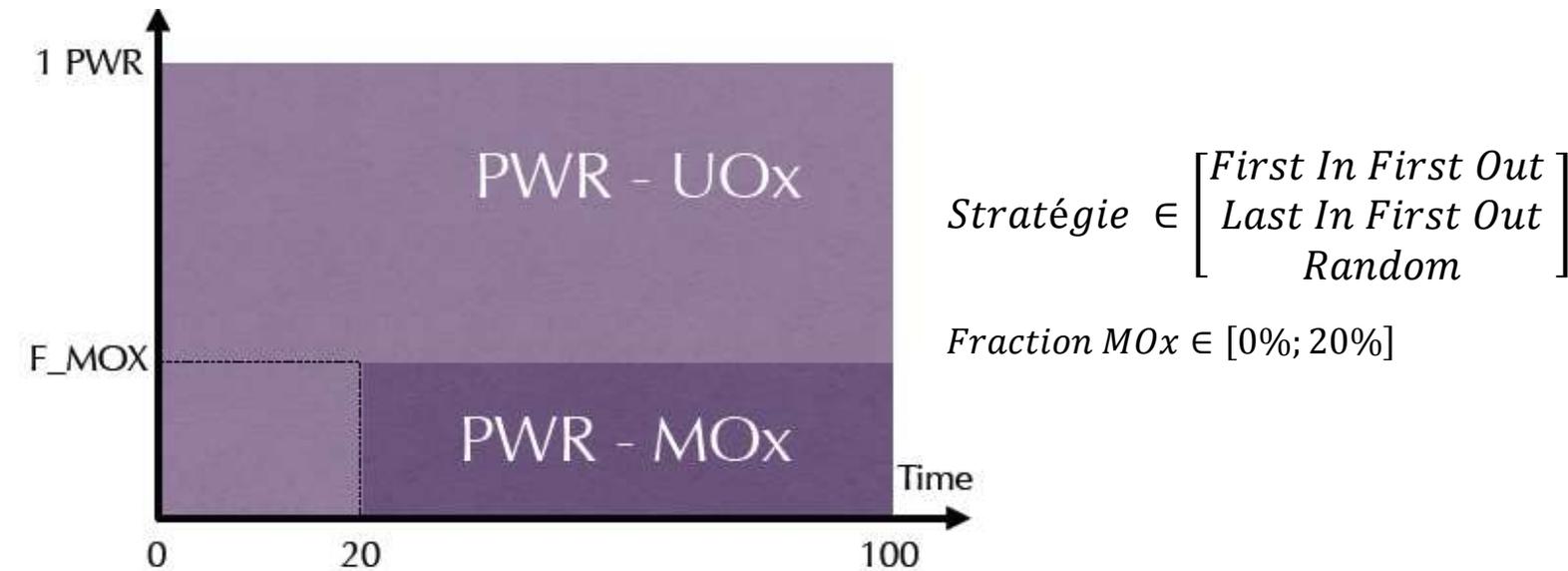
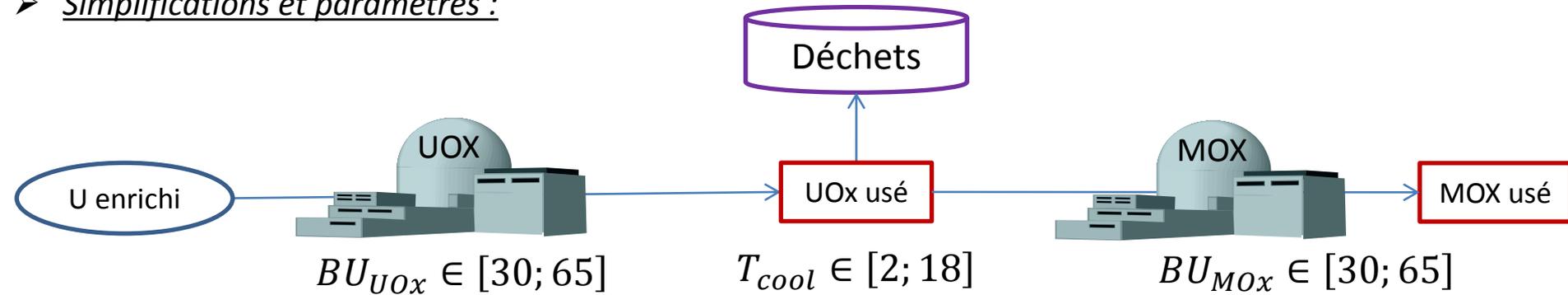
239Cm 92.9 H λ: 100.00% α: 0.10%	240Cm 27 D λ: 99.50% λ: 0.50%	241Cm 32.8 D λ: 99.00% α: 1.00%	242Cm 162.8 D λ: 100.00% SF: 6.2E-6%	243Cm 29.1 Y λ: 99.11% λ: 0.29%	244Cm 18.1 Y λ: 100.00% SF: 1.4E-4%	245Cm 8423 Y λ: 100.00% SF: 6.1E-7%	246Cm 4766 Y λ: 99.97% SF: 0.03%	247Cm 1.56E+7 Y λ: 100.00%
238Am 99 M λ: 100.00% α: 1.0E-4%	239Am 11.9 H λ: 99.99% α: 0.01%	240Am 90.8 H λ: 100.00% α: 1.8E-4%	241Am 432.6 Y λ: 100.00% SF: 4E-10%	242Am 16.02 H β: 82.70% λ: 17.30%	243Am 7370 Y λ: 100.00% SF: 3.7E-9%	244Am 10.1 H β: 100.00%	245Am 2.03 H β: 100.00%	246Am 39 M β: 100.00%
237Pu 43.64 D λ: 100.00% α: 4.2E-7%	238Pu 87.7 Y λ: 100.00% SF: 1.9E-7%	239Pu 24110 Y λ: 100.00% SF: 3.E-10%	240Pu 6561 Y λ: 100.00% SF: 5.7E-6%	241Pu 14.325 Y β: 100.00% α: 2.5E-9%	242Pu 3.75E+5 Y λ: 100.00% SF: 5.5E-4%	243Pu 4.95E H β: 100.00%	244Pu 8.00E+7 Y λ: 99.89% SF: 0.12%	245Pu 10.5 H β: 100.00%
236Np 153E+3 Y λ: 86.30% β: 13.50%	237Np 2.144E+6 Y λ: 100.00% SFs: 2E-10%	238Np 3.117 D β: 100.00%	239Np 3.35E D β: 100.00%	240Np 61.9 M β: 100.00%	241Pu 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 %			244Np 2.29 M β: 100.00%
235U 7.04E+8 Y 0.7204% λ: 100.00% SF: 7.0E-9%	236U 2.342E7 Y λ: 100.00% SF: 9.4E-6%	237U 6.75 D β: 100.00%	238U 4.468E9 Y 99.274% λ: 100.00% SF: 5.5E-9%	239U 23.45 M β: 100.00%	240U 14.1 H β: 100.00%	241U 16.9 M β: 100.00%	242U	

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 :

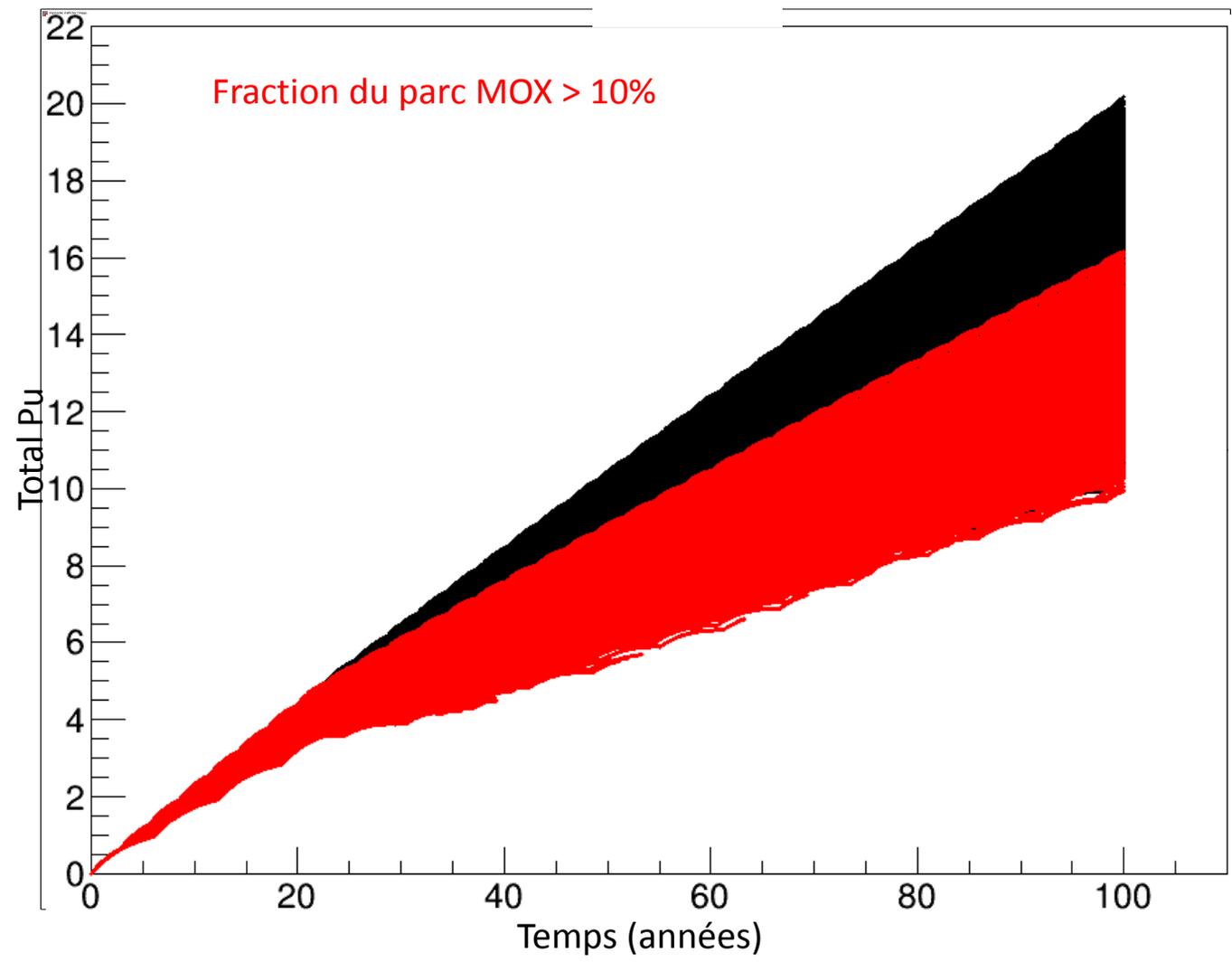
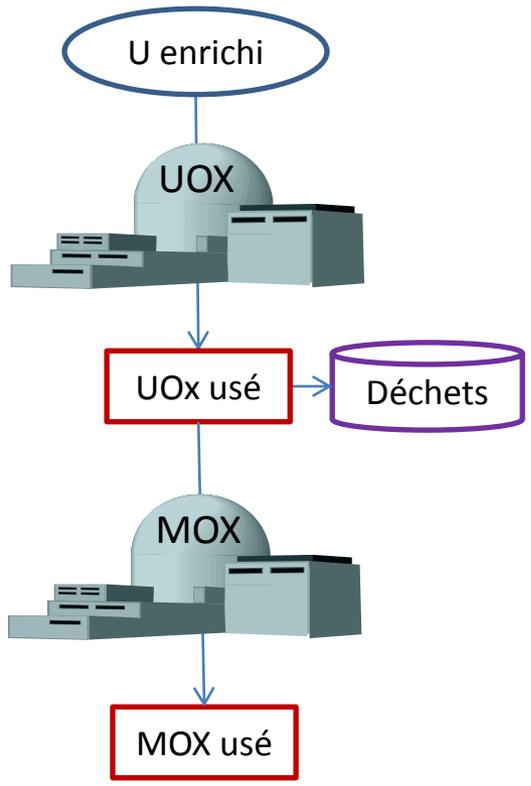


➤ Echantillonnage et réalisation de N calculs (N ~ 10 000)

➤ Observables

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

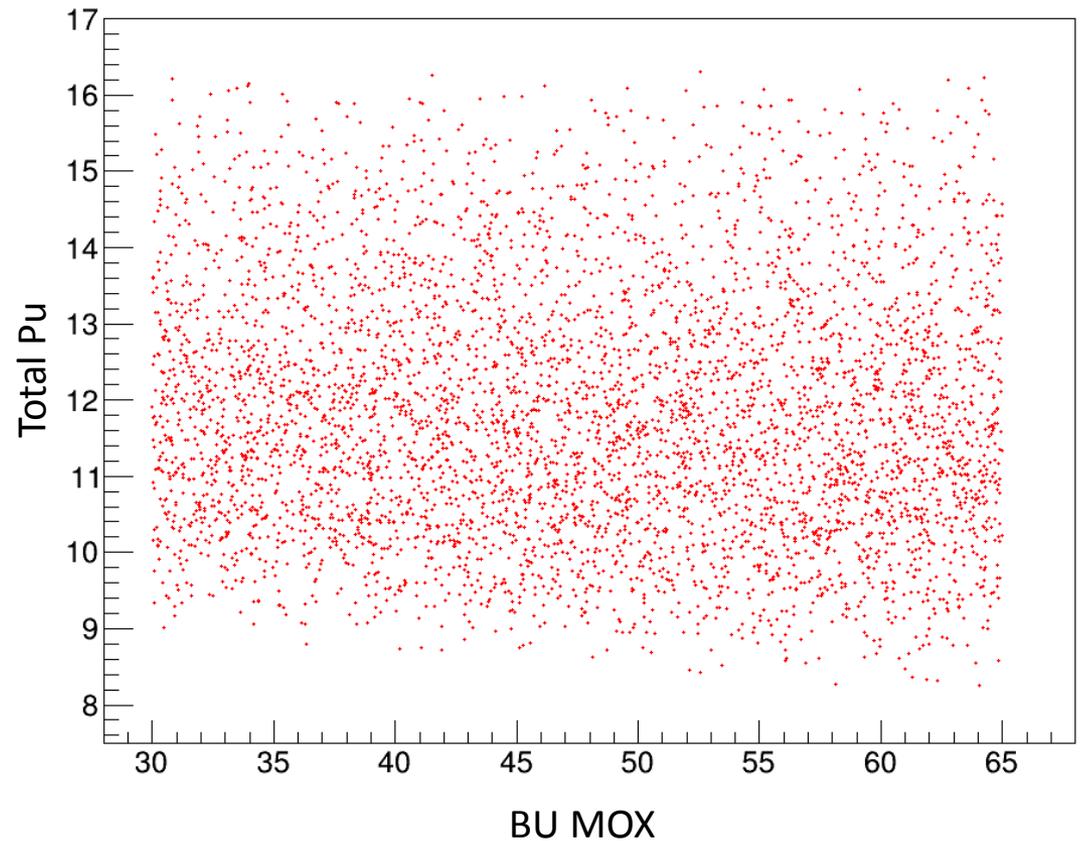
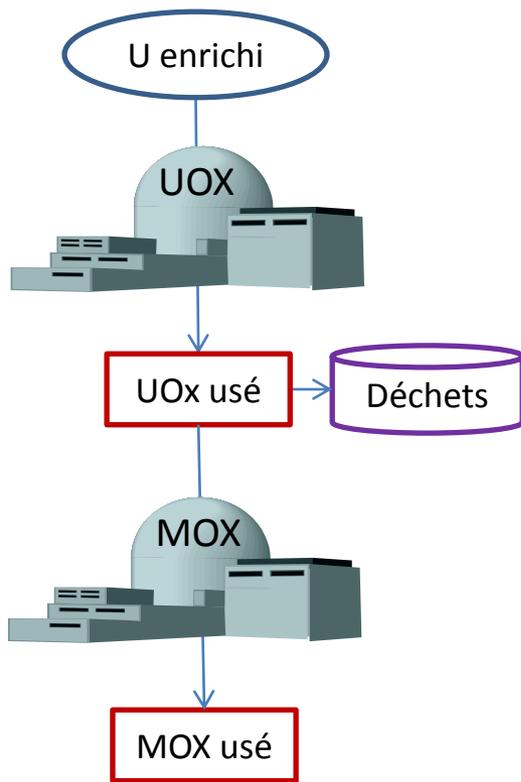
➤ Ensemble des évolution du plutonium en fonction du temps



Production de Pu

➤ La production de Pu ne dépend pas du BU des MOX

Ex : après 80 ans de fonctionnement



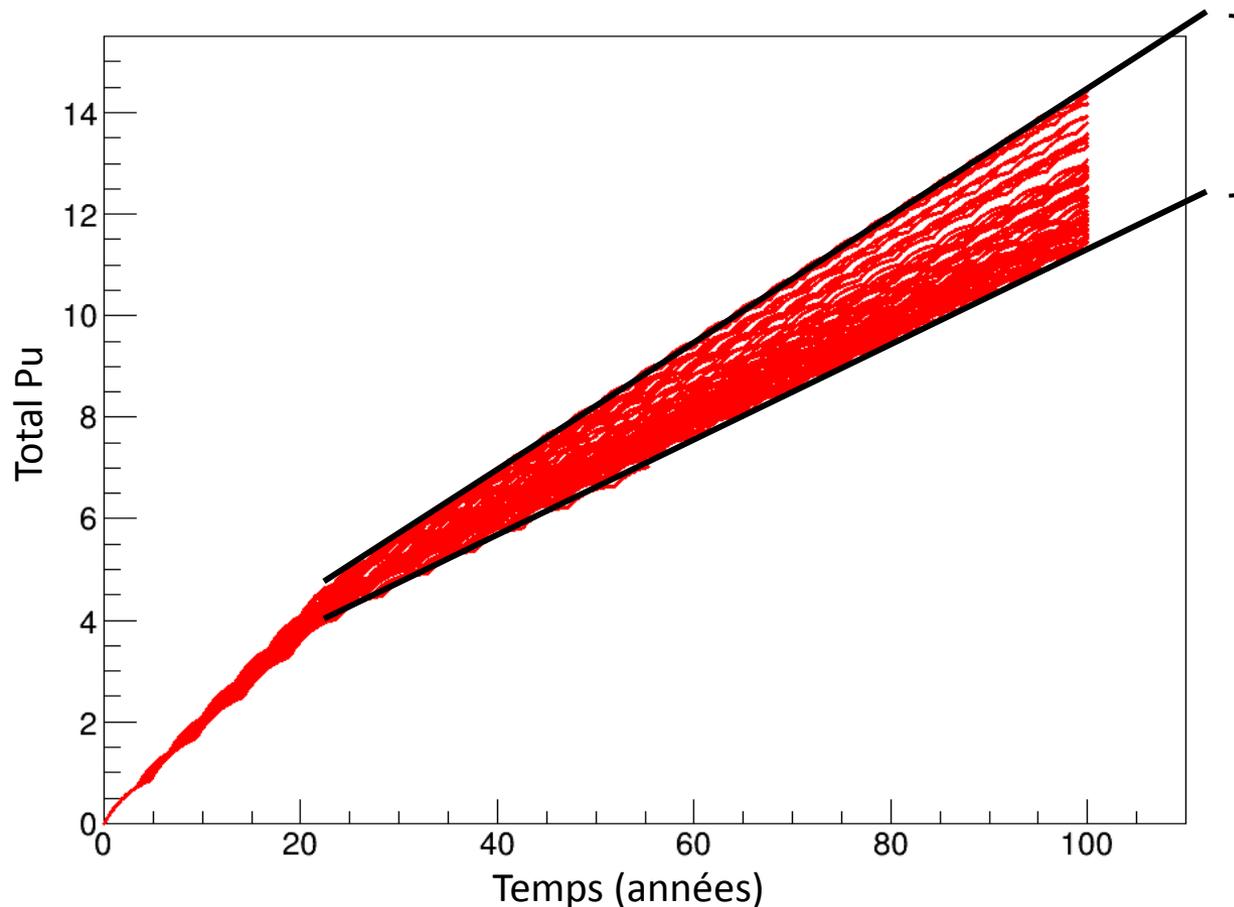
Rappel : Le Burn-up mesure l'énergie tirée par tonne de métal lourd (U+Pu)

→ Plus le BU est élevé, et plus l'enrichissement des MOX est important

→ Si on introduit plus de Pu en début d'irradiation, on en brûle plus...

➤ 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)

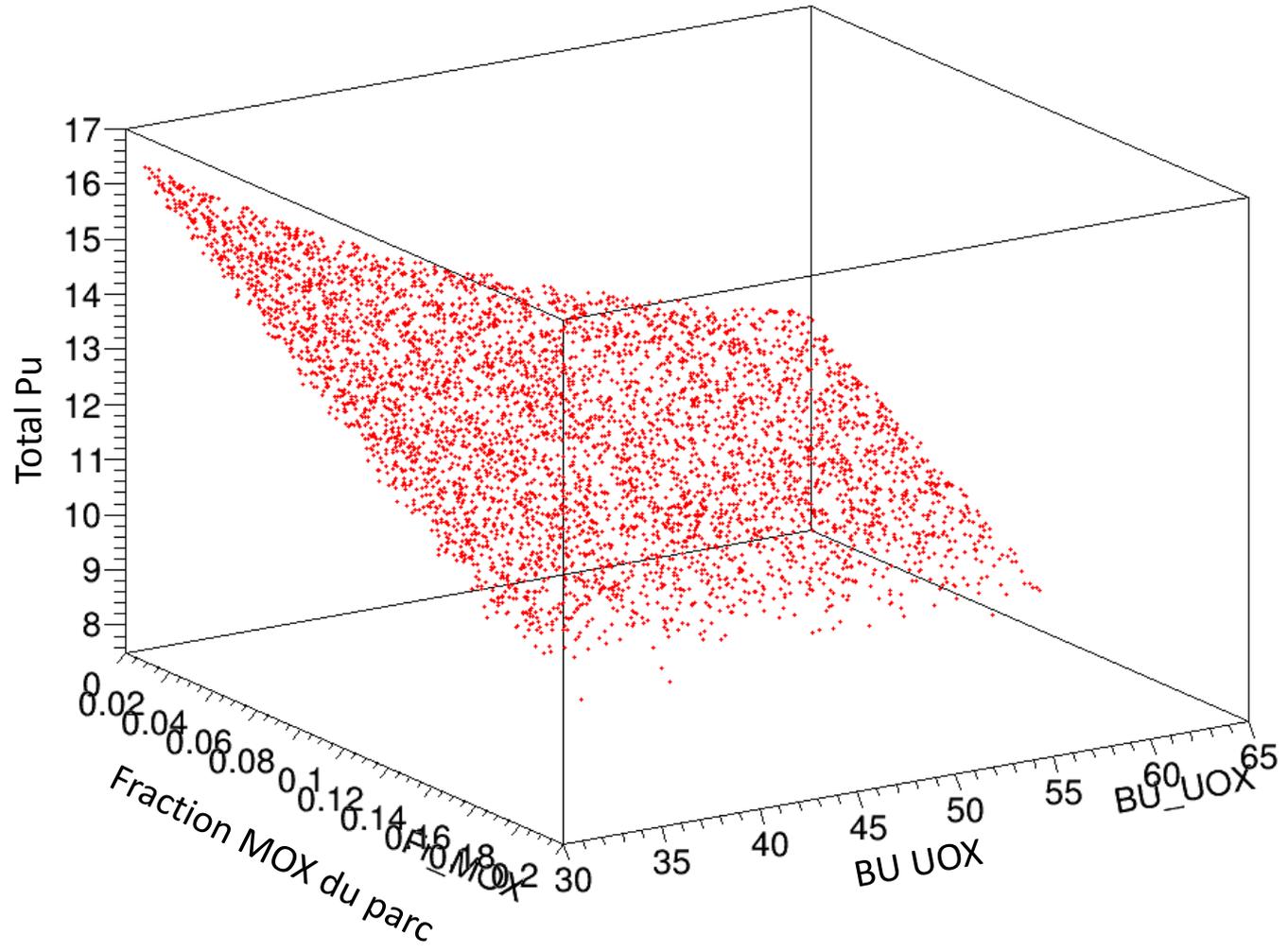
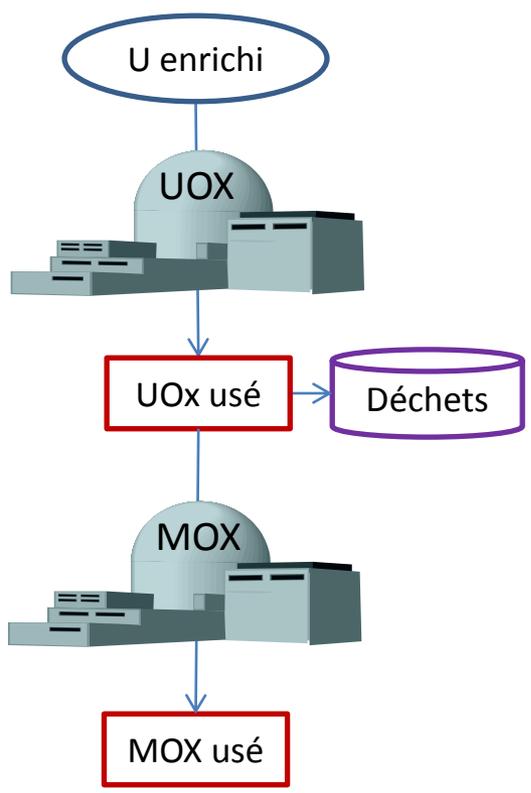


Variation de pente :
28 %

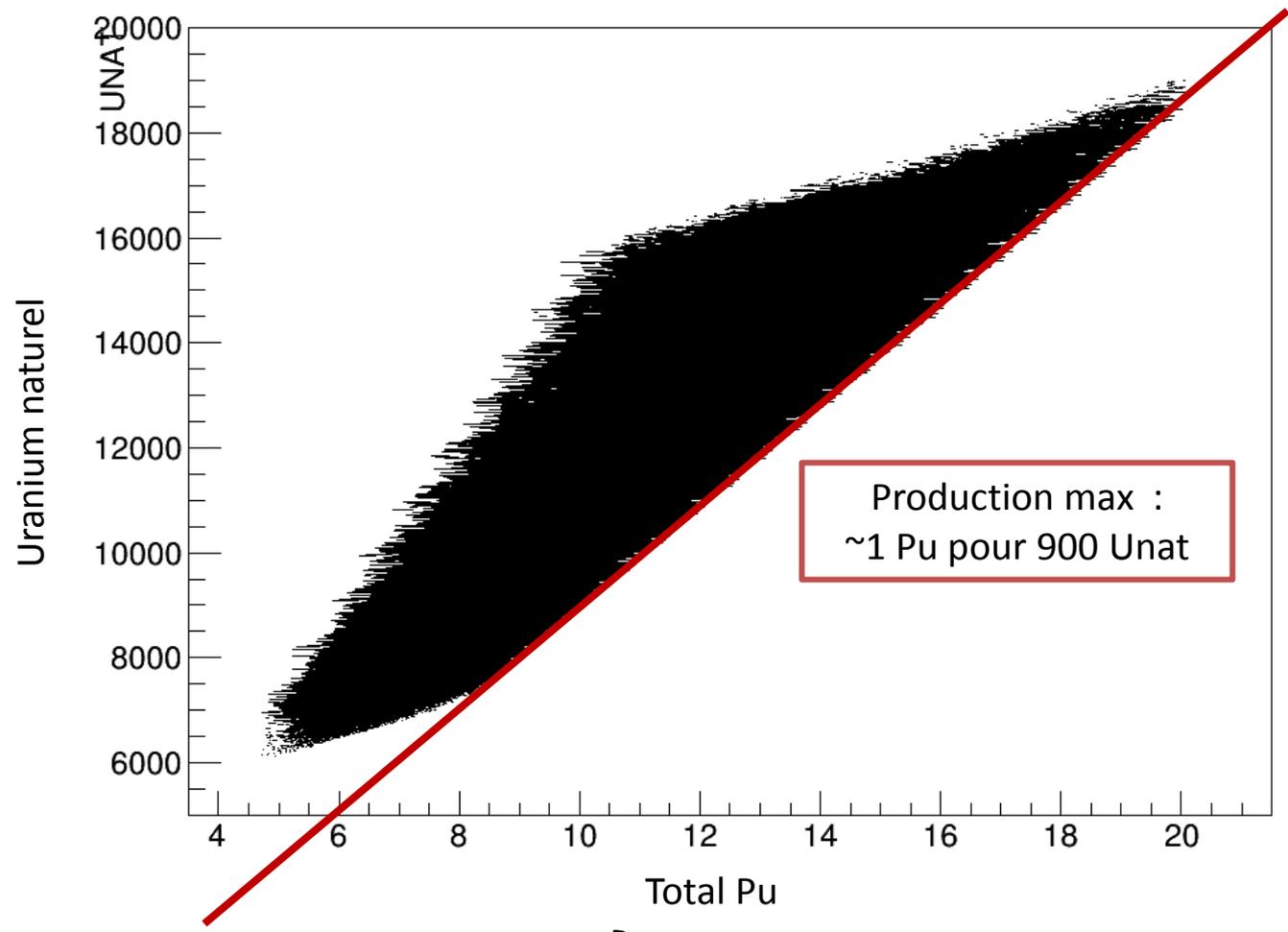
- Pour un parc 100% RNR il faut 1500 tonnes de plutonium
- Au rythme actuel de ~ 10 t/ans, un parc 100% RNR (à puissance constante) sera possible en 2150 !

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



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

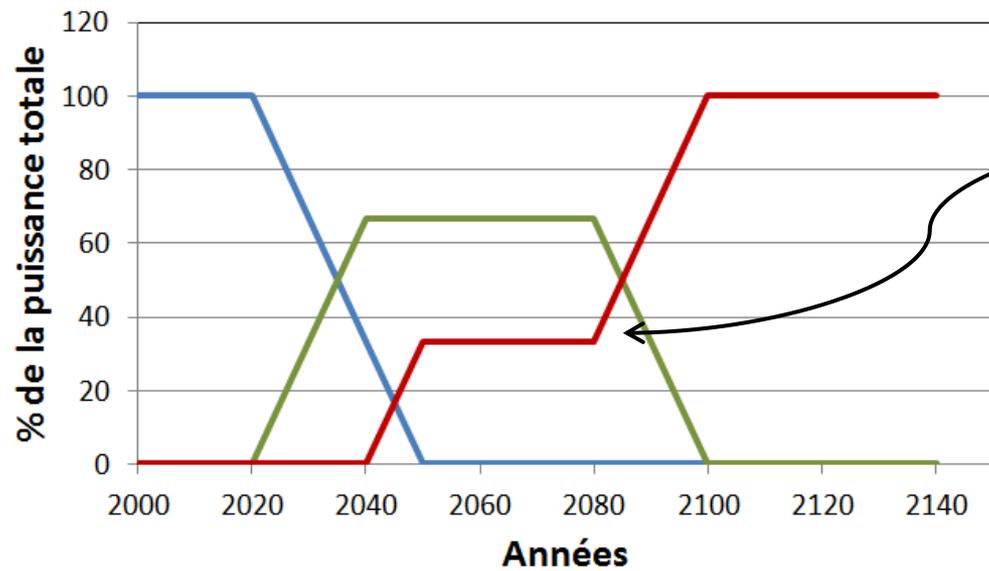


- Rappels :
- 1 RNR = 15 à 20 tonnes de Pu
 - $\sim 10^7$ tonnes d'uranium naturel disponible

→ Entre 500 et 700 RNR possibles

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

« Tendus mais ça passe »

- 100% du parc en 2100 → Il faut produire 1000 tonnes de Pu en 50 ans !
→ *Le scénario de référence paraît 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*

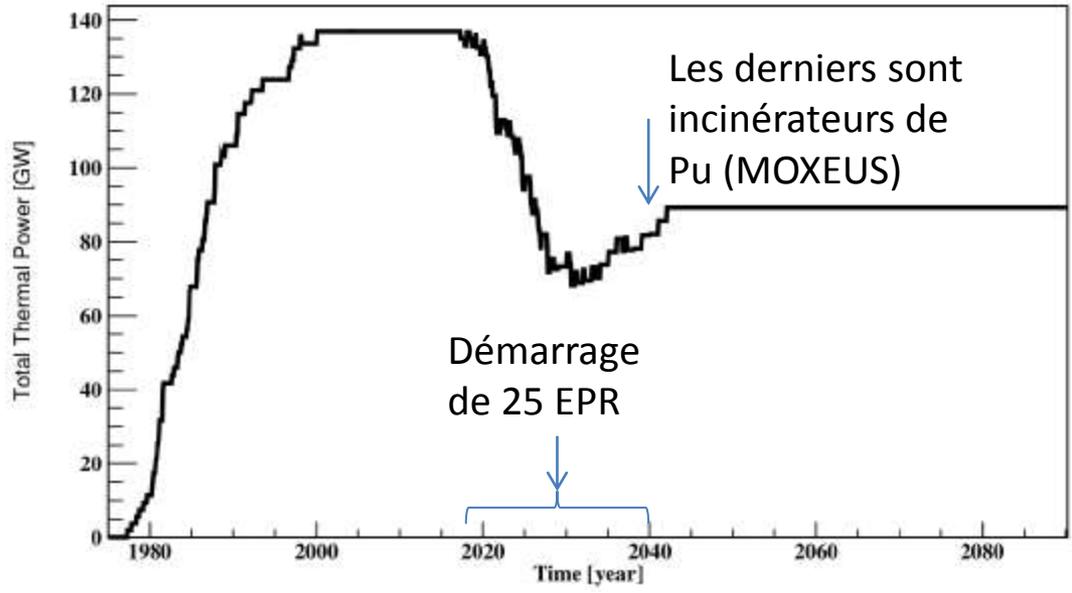
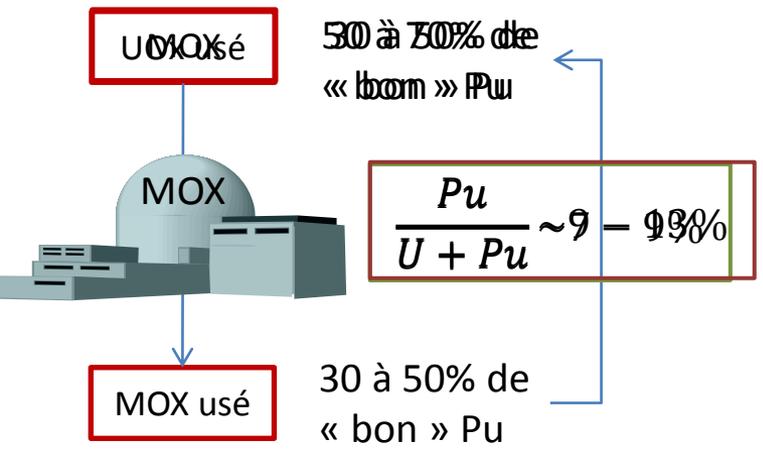
Stratégie Française : stratégie flexible qui permet le choix passé 2050 !

Une stratégie d'attente ? Jusqu'à quand ?

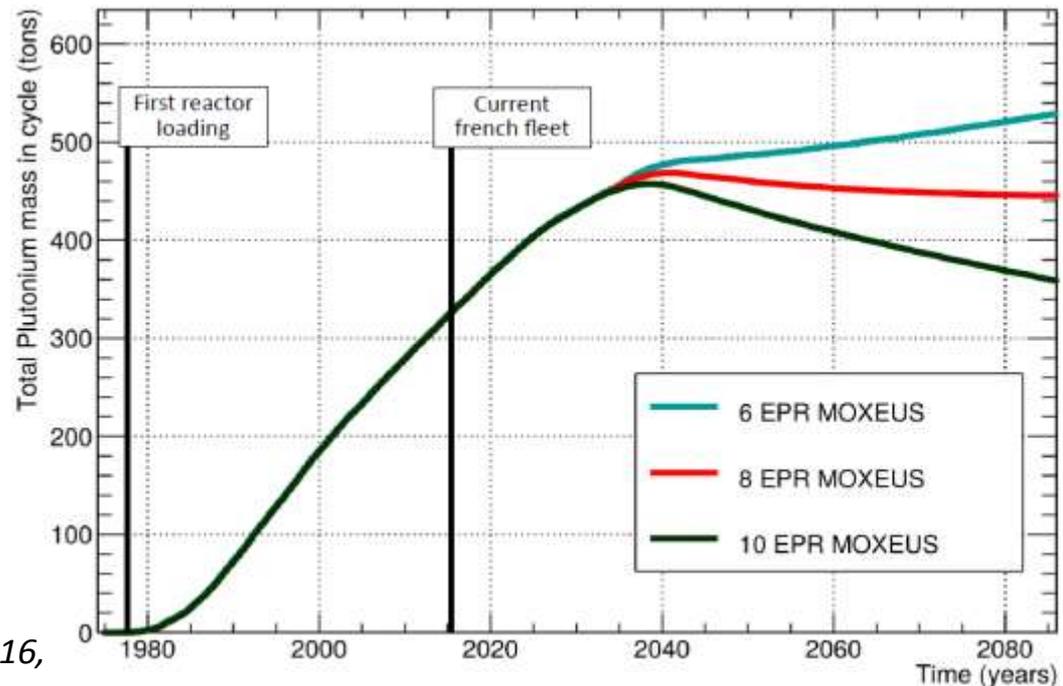
➤ La stabilisation du Pu :

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





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 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

Quelques messages personnels... (après discussion...)

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 nucléaire

Changement de paradigme : les applications alimentent la physique fondamentale