

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

Promotion Vera Rubin
Rencontre des deux infinis
15 - 26 juillet 2019

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'une réaction en chaîne

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 → 1^{er} choc pétrolier

1974 – 1980 → Engagement de l'équivalent de 55 réacteurs



Un peu d'histoire

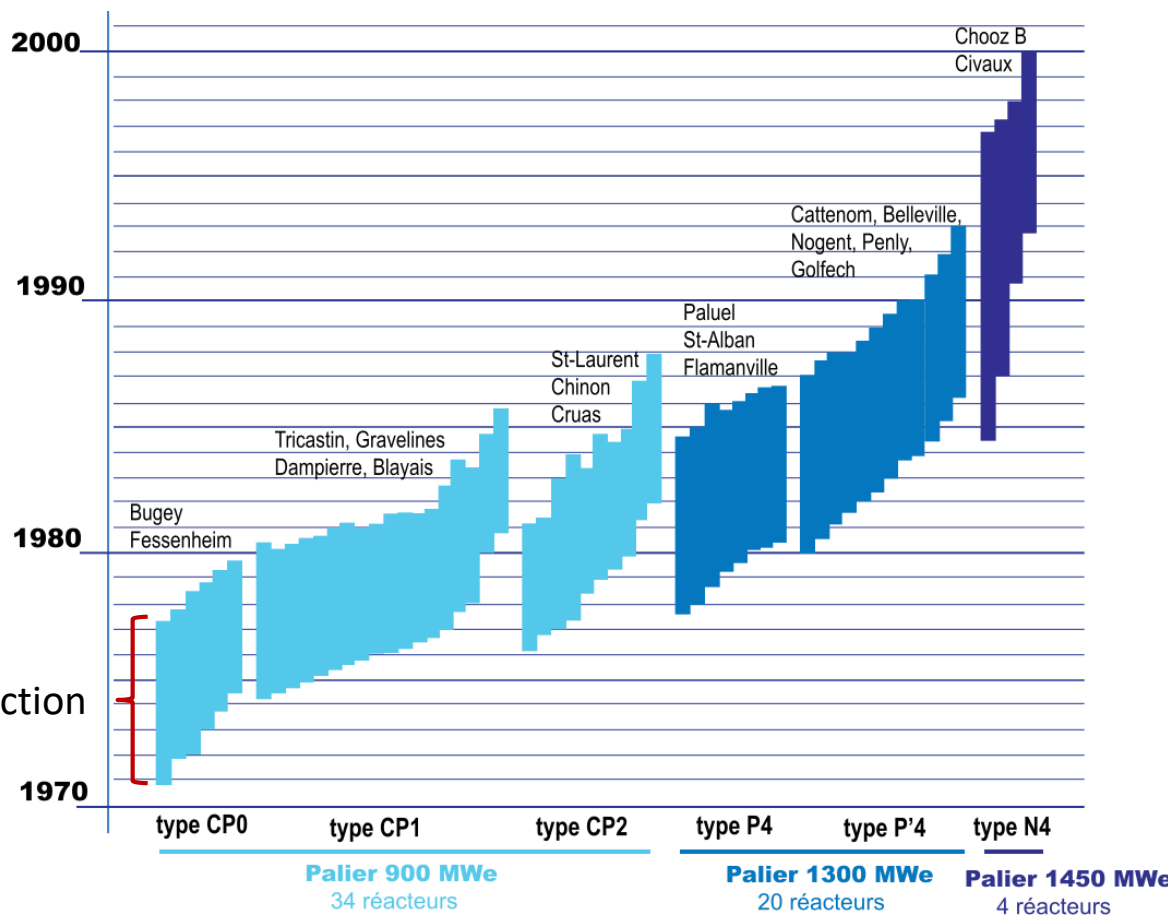
- Jusqu'à 6 nouveaux réacteurs par an
- Un réacteur construits en 5 ans

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



Un réacteur pour 1,1 millions d'habitants

Temps de construction



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 ?

- 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

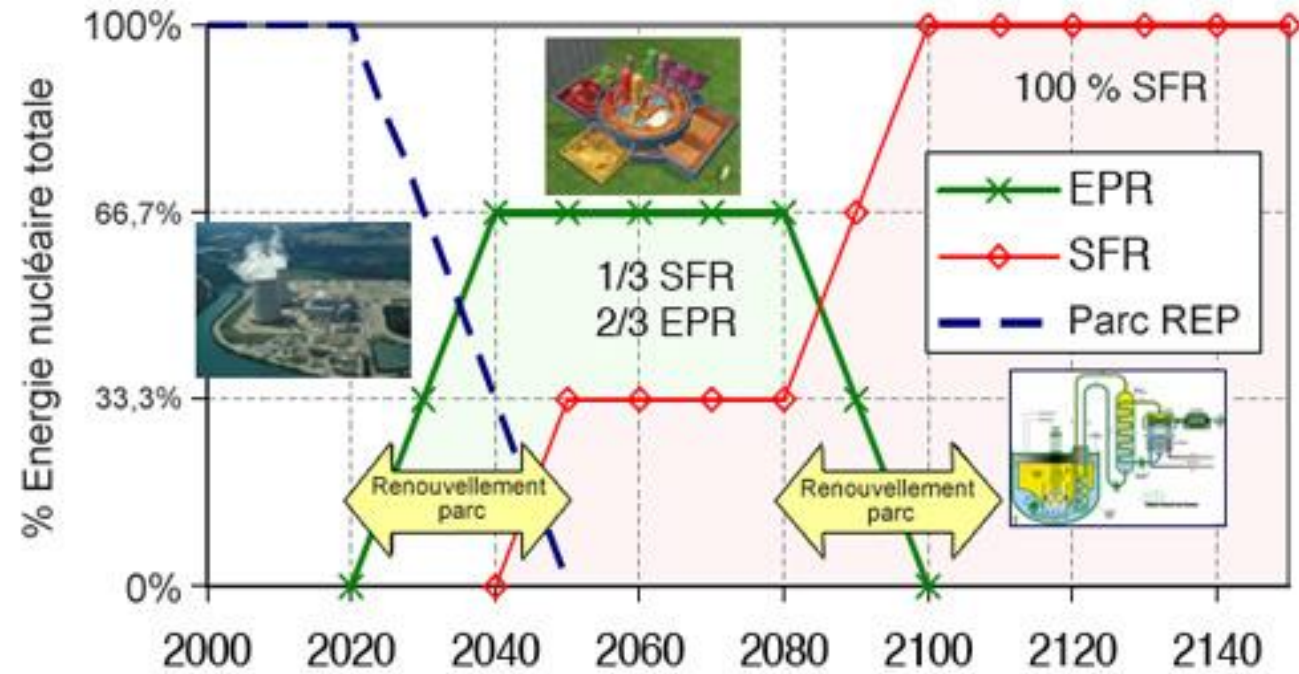
Indépendance énergétique

Crainte d'un accident nucléaire en France

Production d'électricité à un coût très compétitif

Et pour le futur ?

➤ Scénario Français de référence pour le nucléaire :



→ Maintien de la puissance nucléaire

→ Transition progressive (en deux étapes) des Réacteur à Eau sous Pression vers les Réacteurs à Neutrons Rapides

*Pour un développement
du nucléaire*

... Mais ...



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

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

ANNALES DE PHYSIQUE

Construction
d'un monde énergétique
en 2050

S. Bouneau, S. David, J.-M. Loiseaux, O. Méplan



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 !

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

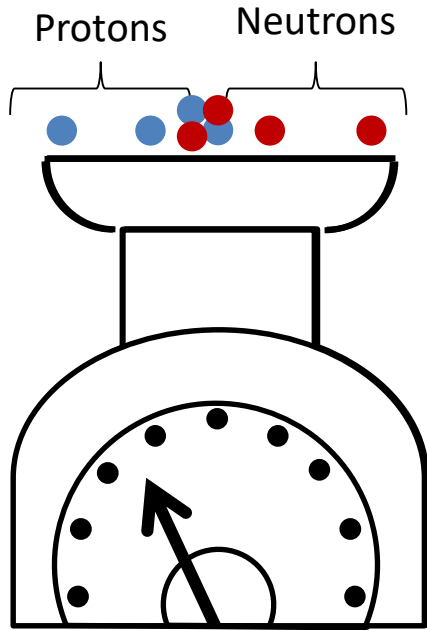
Qu'est ce que c'est ?
Un choix pour le futur et donc un non-choix ?

Conclusions

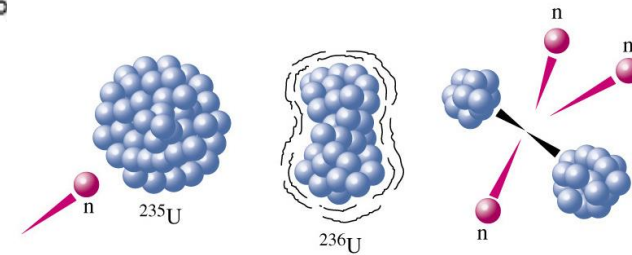
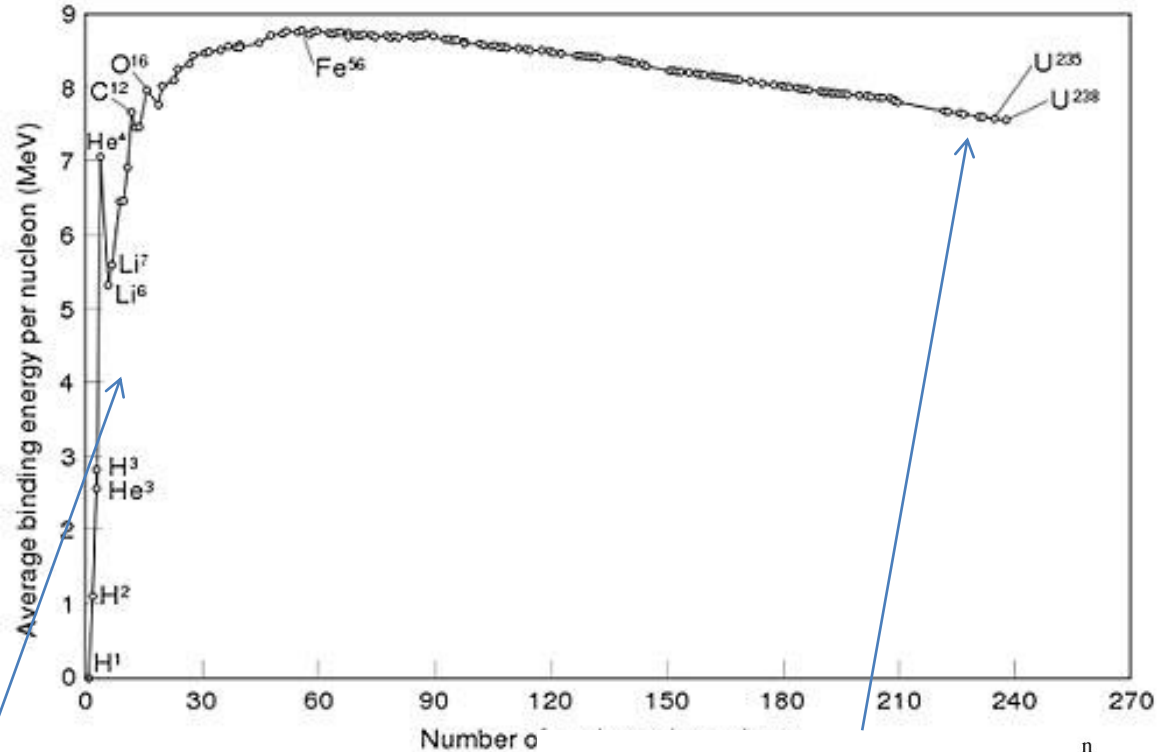
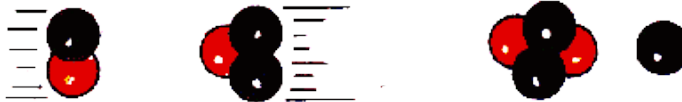
Des ordres de grandeurs qui compliquent le débat
Les projets de réacteurs européens
La place de la recherche académique dans le débat

L'énergie des noyaux

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

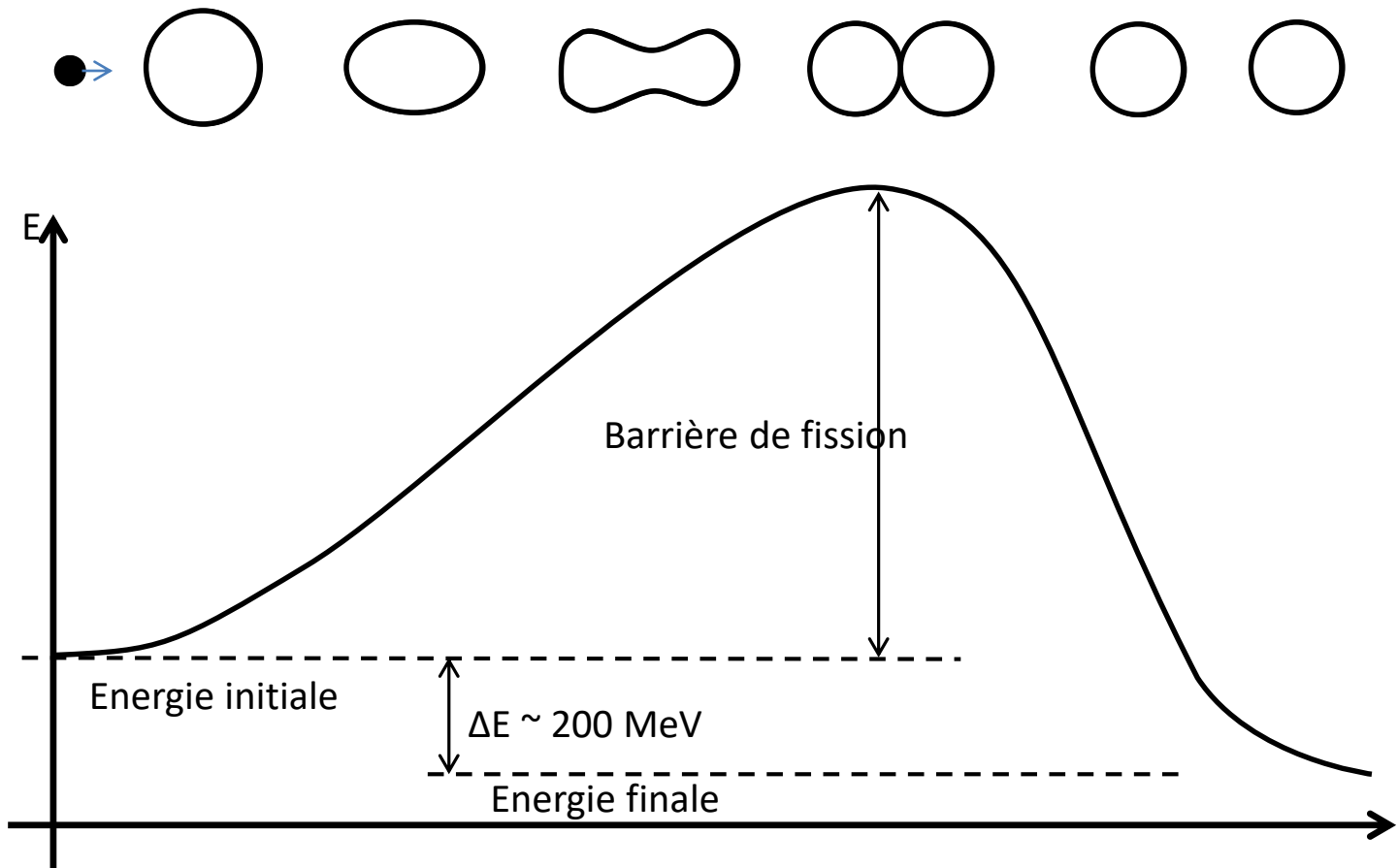


Le défaut de masse quantifie la liaison des nucléons dans le noyau



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

➤ Comment provoque-t-on la fission ?

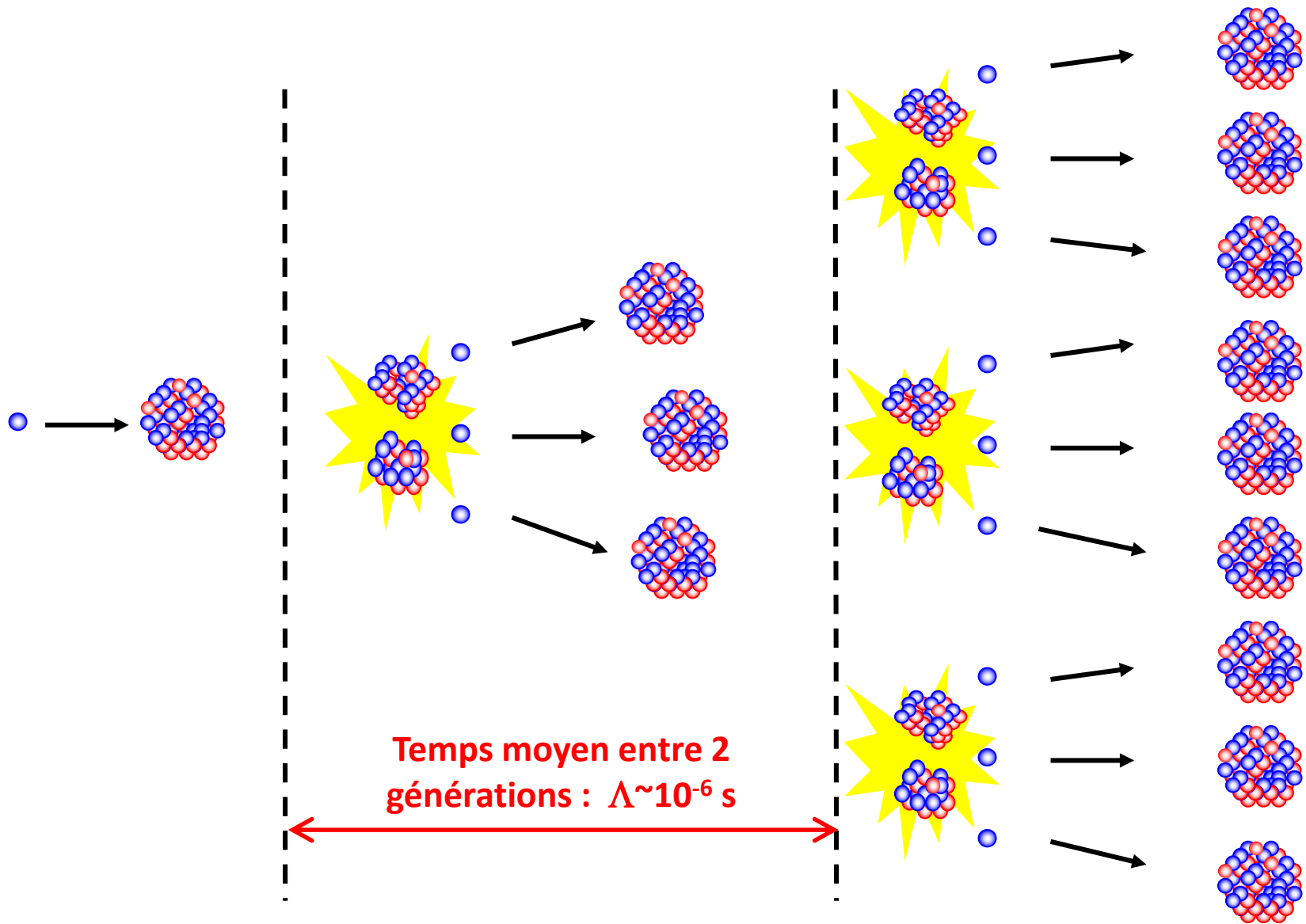


➤ L'énergie apportée par un neutron d'énergie cinétique nulle est suffisante pour provoquer la fission d'un noyau d'U-235

➤ 200 MeV ? C'est beaucoup ?

La fission et la réaction en chaîne :

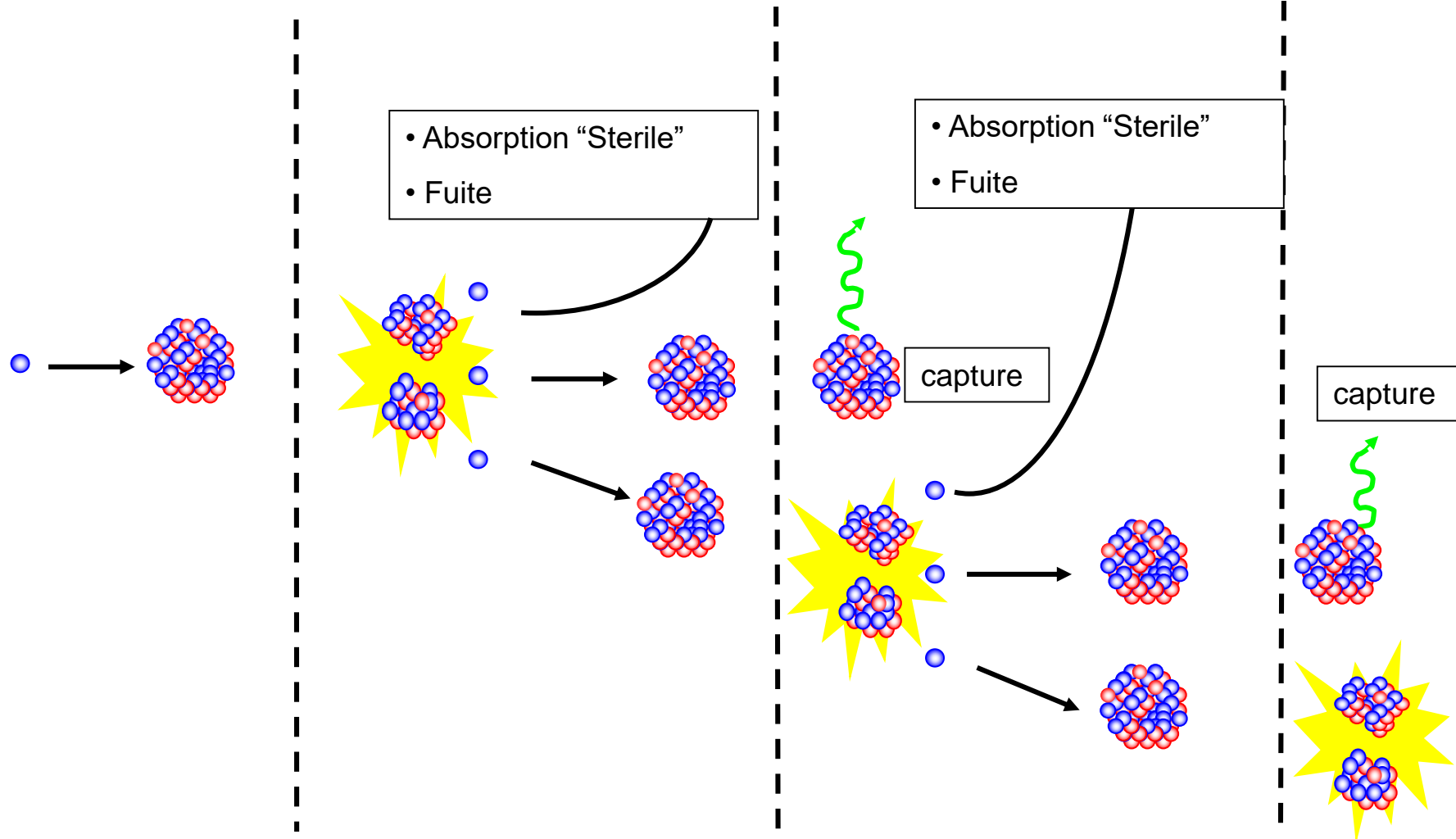
- *La fission des noyaux lourds libère entre 2 et 3 neutrons, produit deux fragments de fission et une grande quantité d'énergie (200 MeV)*



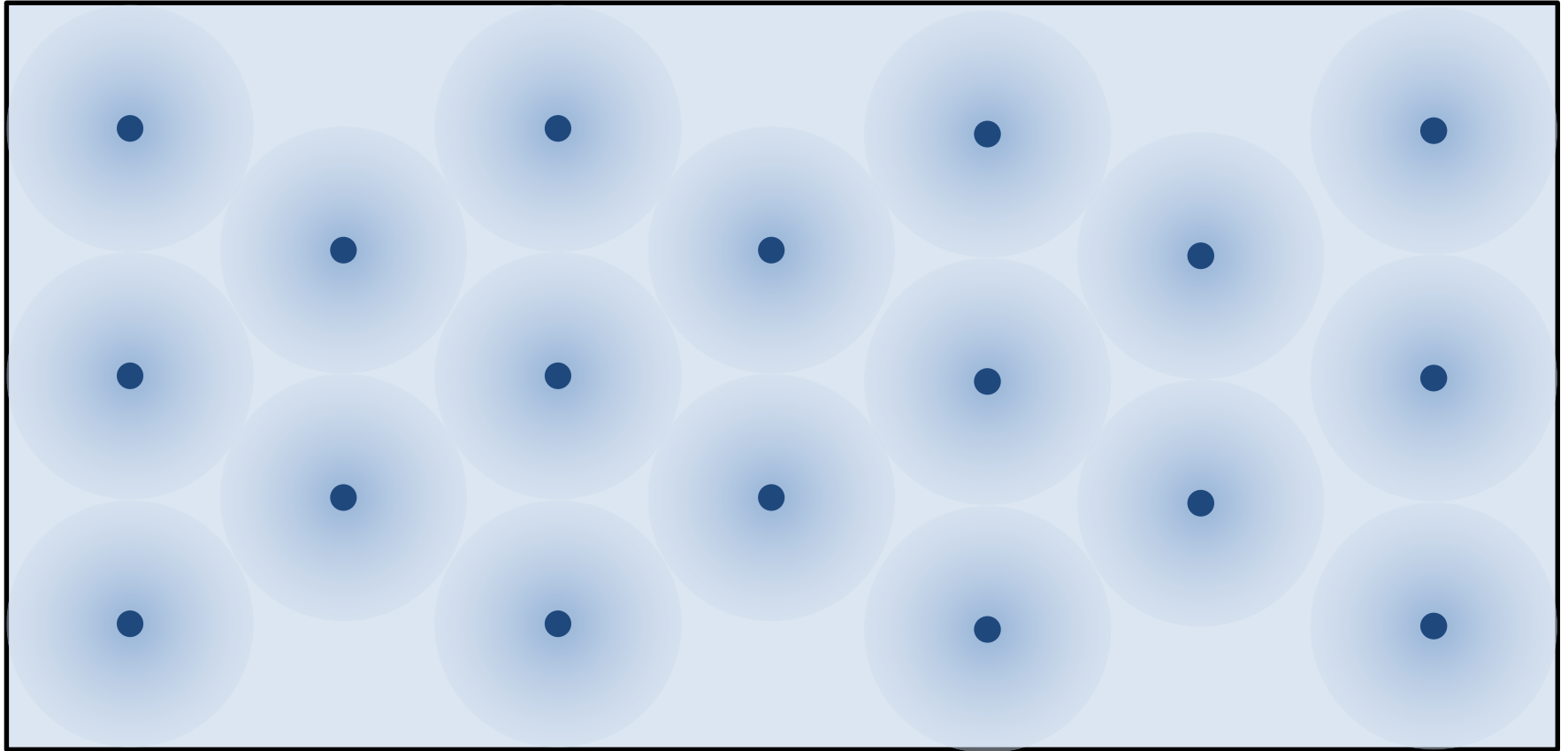
La fission et la réaction en chaîne :

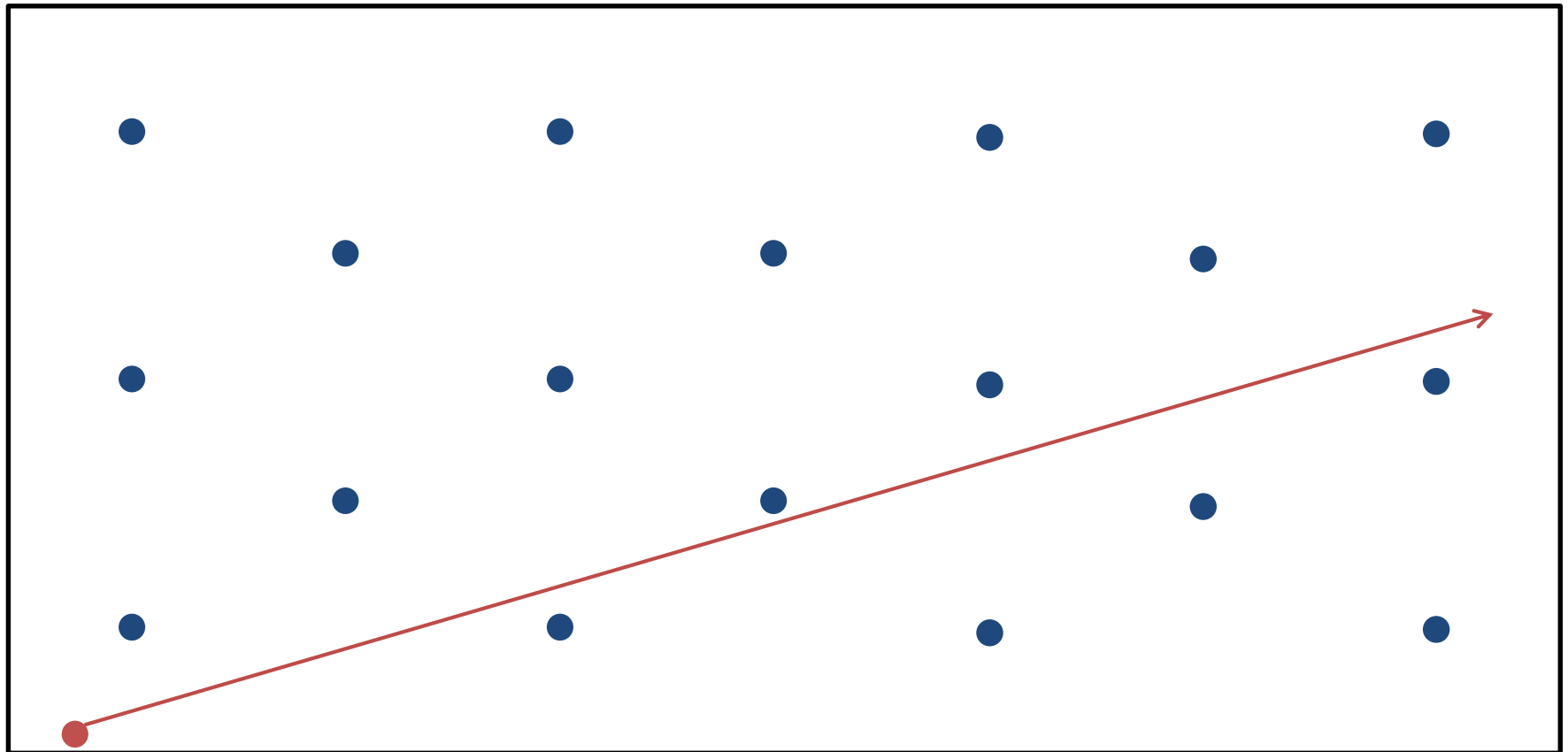
On définit la criticité (ou la réactivité) ou la multiplication des neutrons (k)

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



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



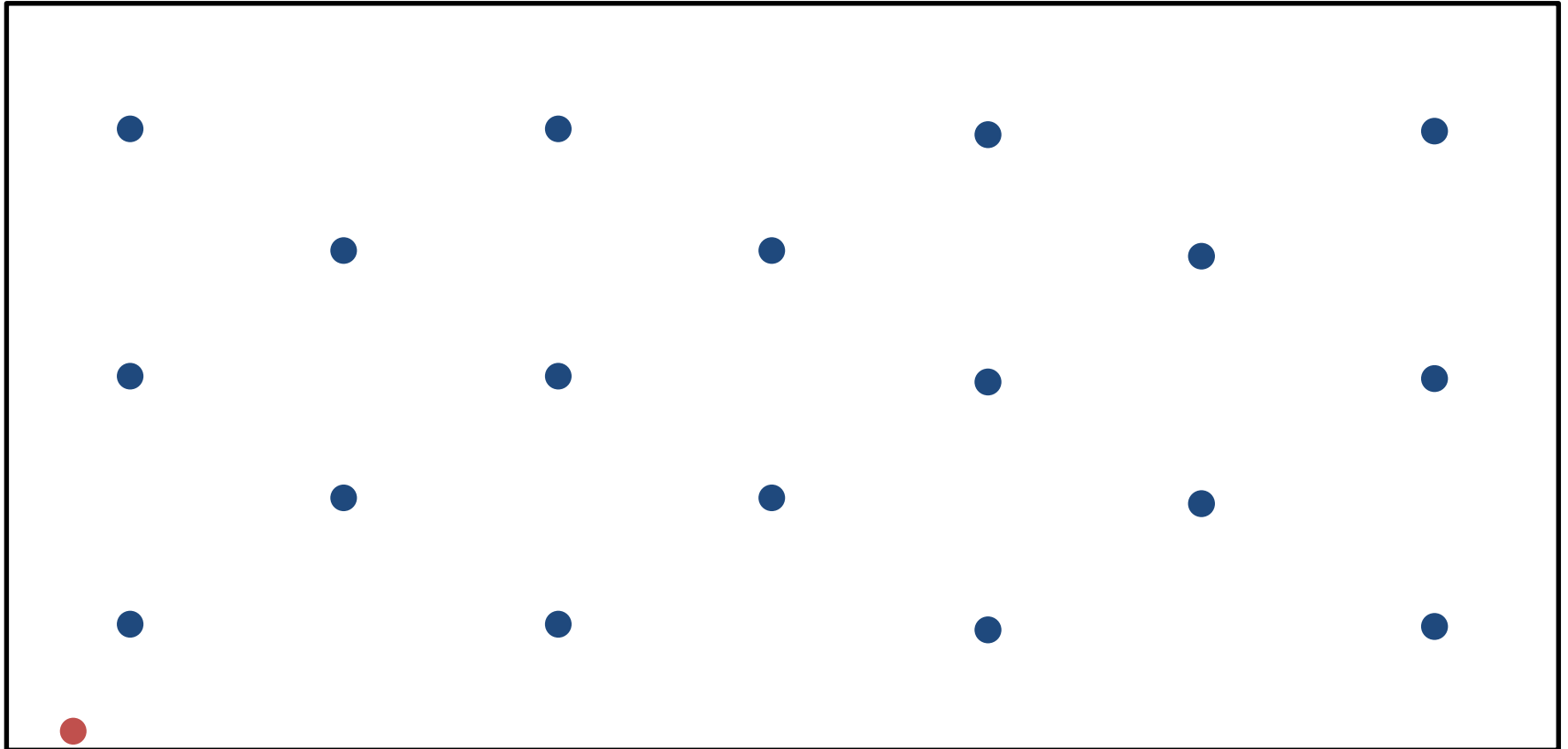


Les neutrons parcourent de grandes distances sans interagir avec la matière

Pas de système nucléaire de taille « microscopique »

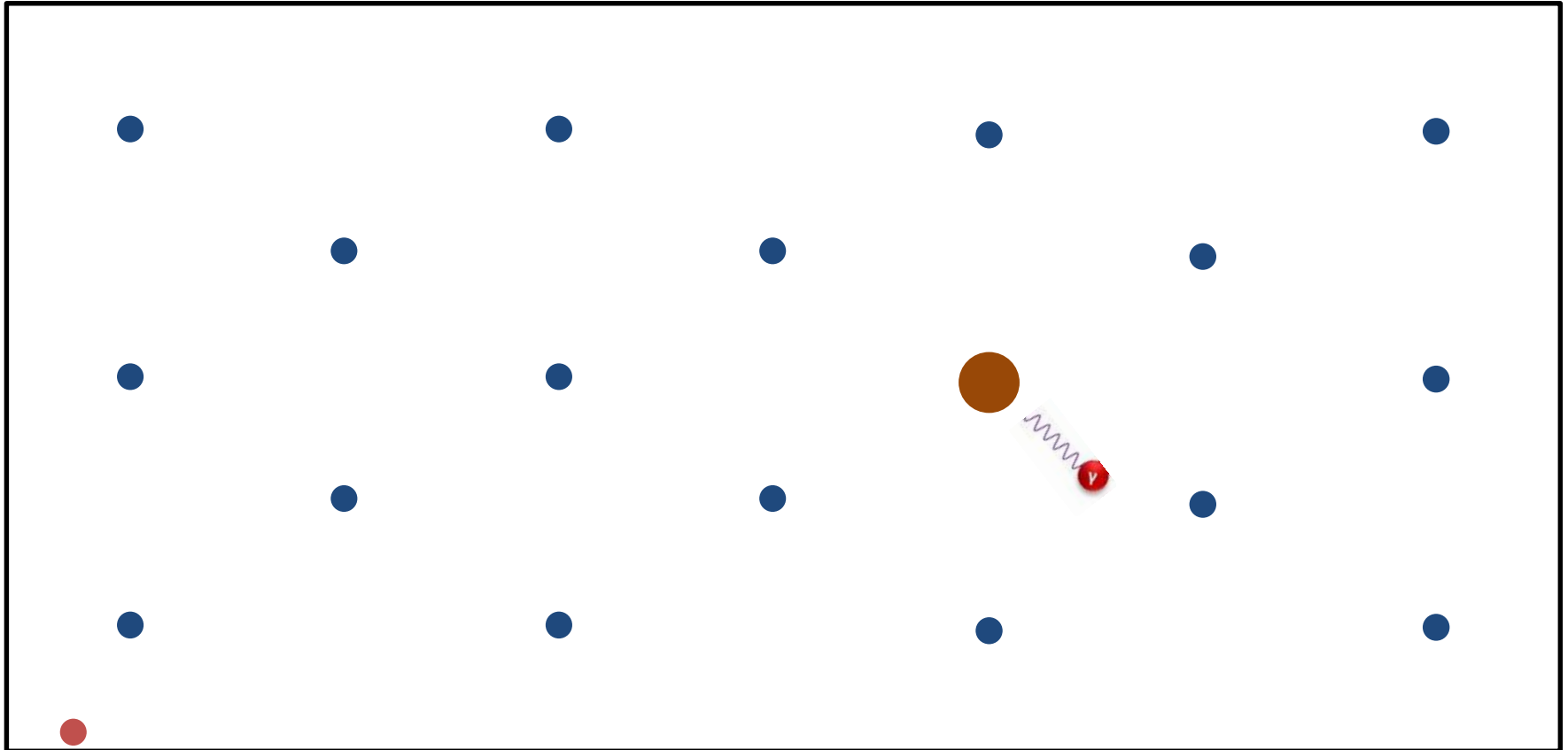
L'interaction des neutrons avec la matière et la criticité

- 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

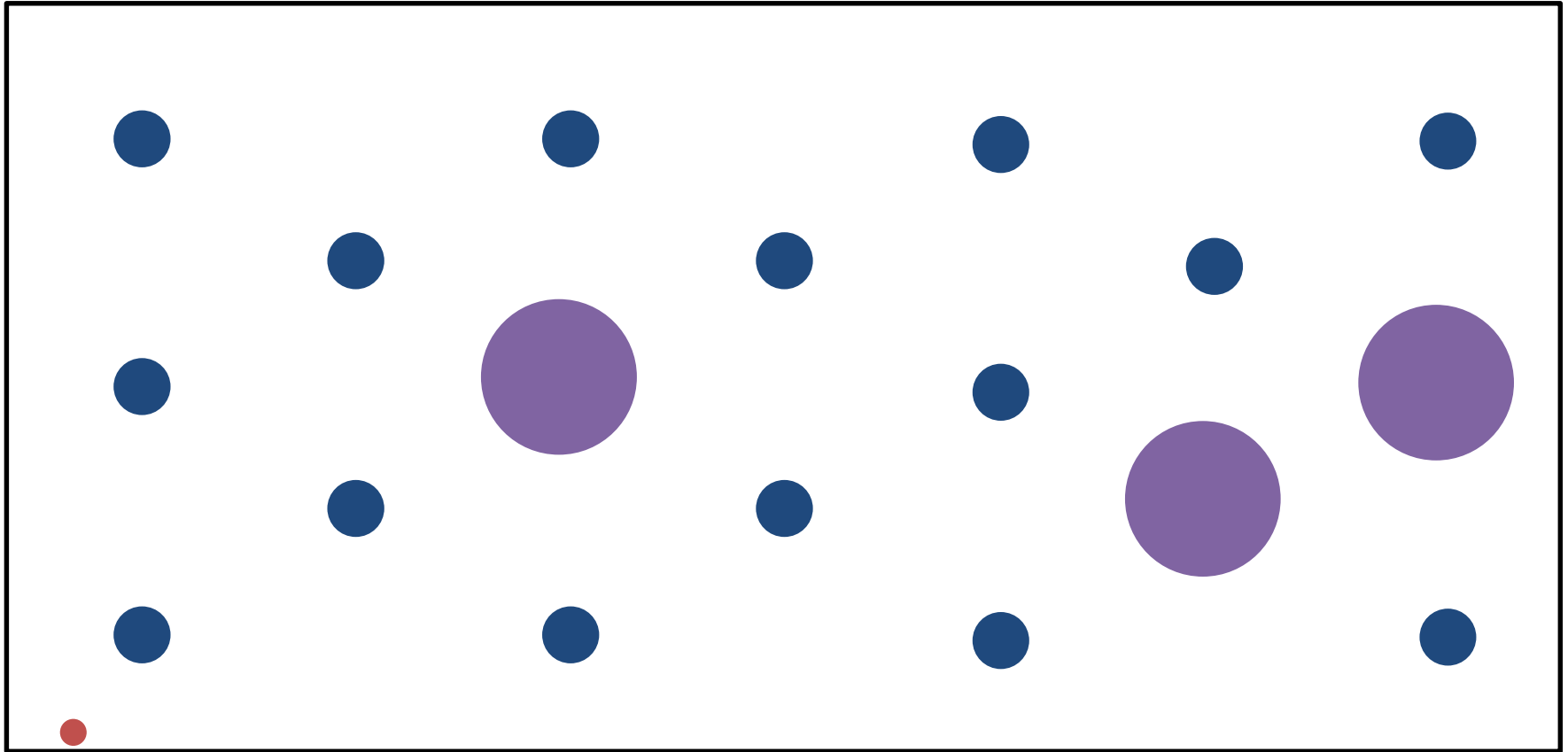
Dans les autres cas, l'absorption est dite stérile

→ 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' ^{235}U augmente :



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

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

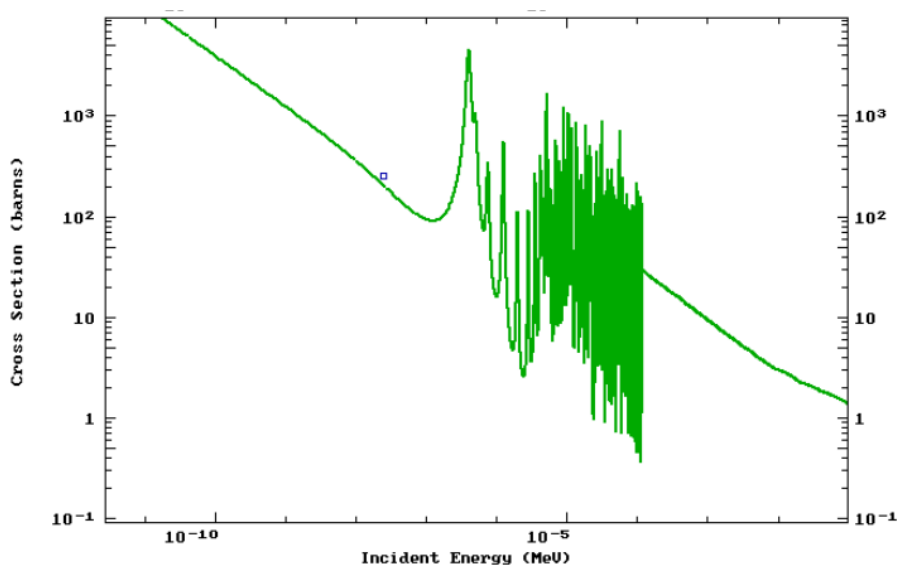
$$R_{r,i} = N_i \times \sigma_{r,i} \times \Phi$$

Flux de neutrons
($\text{neutrons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

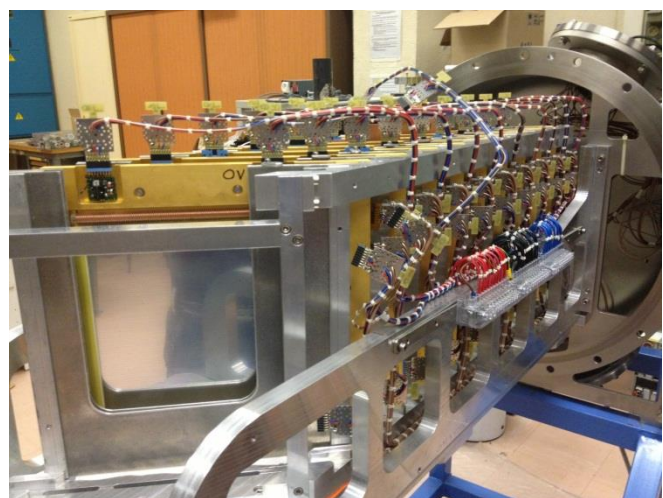
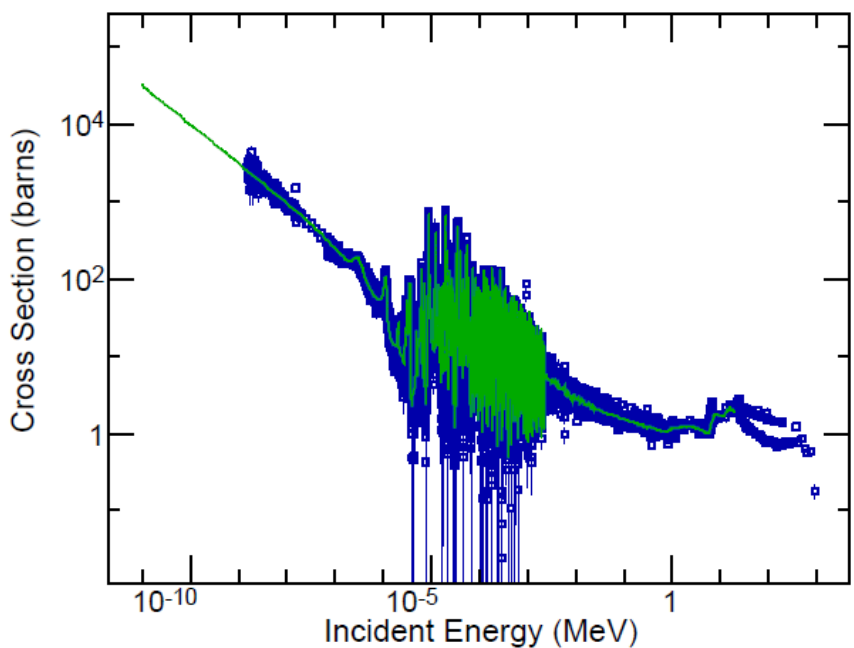
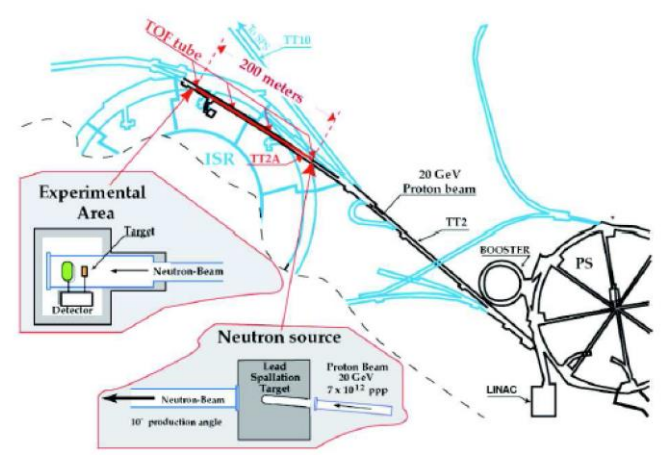
Densité de noyau i ($\text{noyau} \cdot \text{cm}^{-3}$)

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

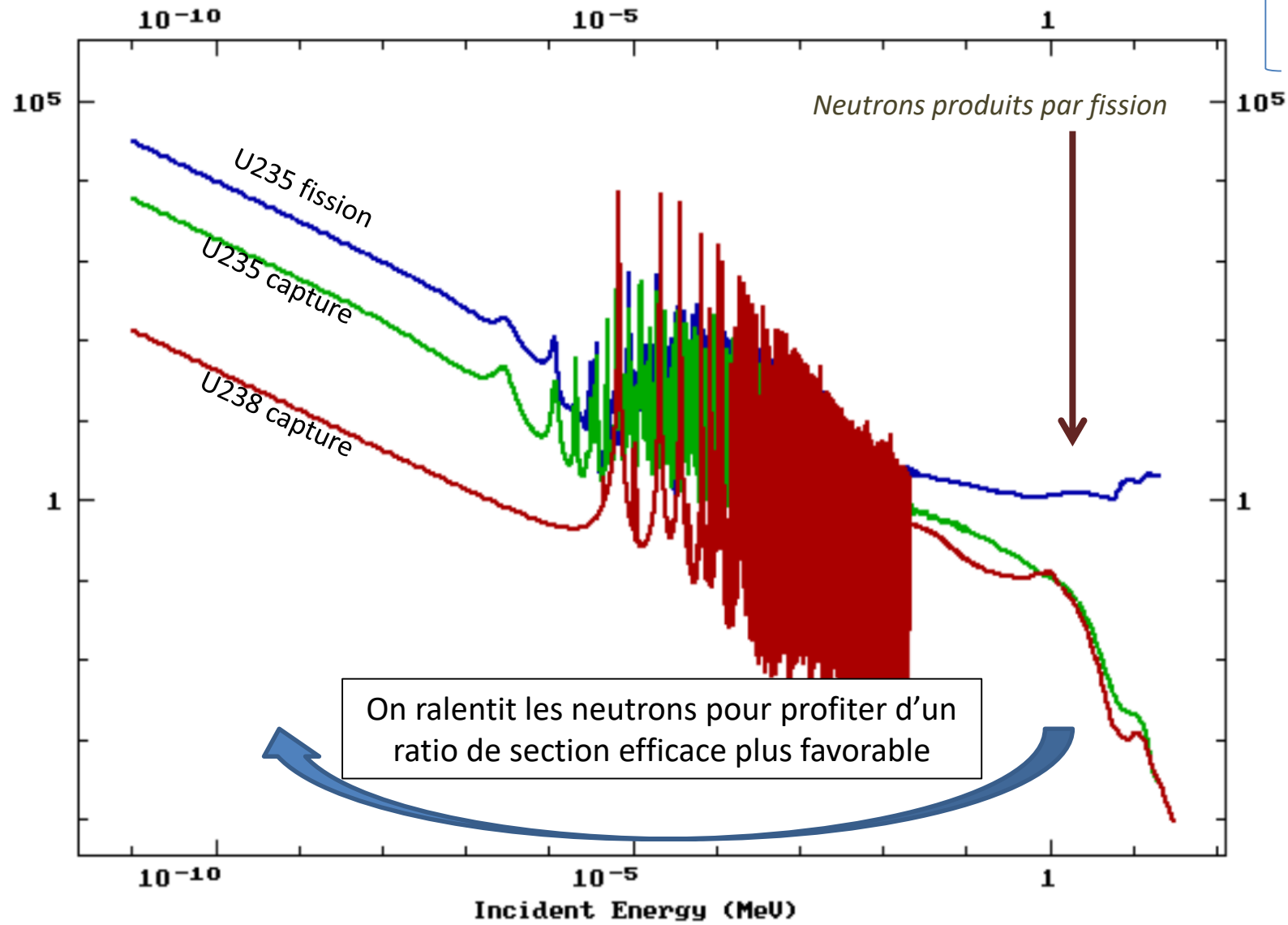


L'interaction des neutrons avec la matière et la criticité

- $\sigma_{r,i}$ 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

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

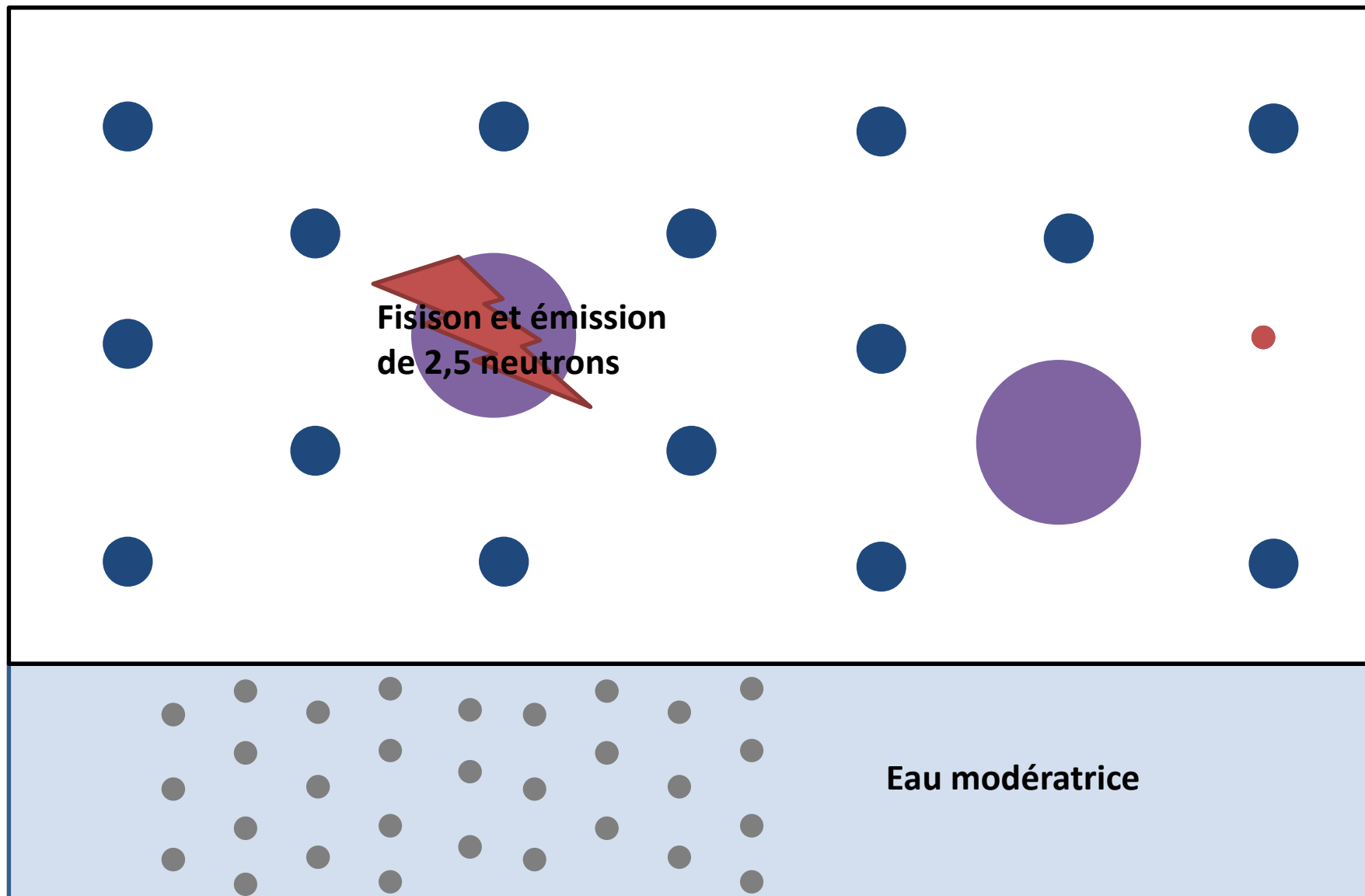
$$= \frac{\nu N_{U235} \sigma_f \phi}{\sum_{i,r} N_{i,r} \sigma \phi}$$



L'interaction des neutrons avec la matière

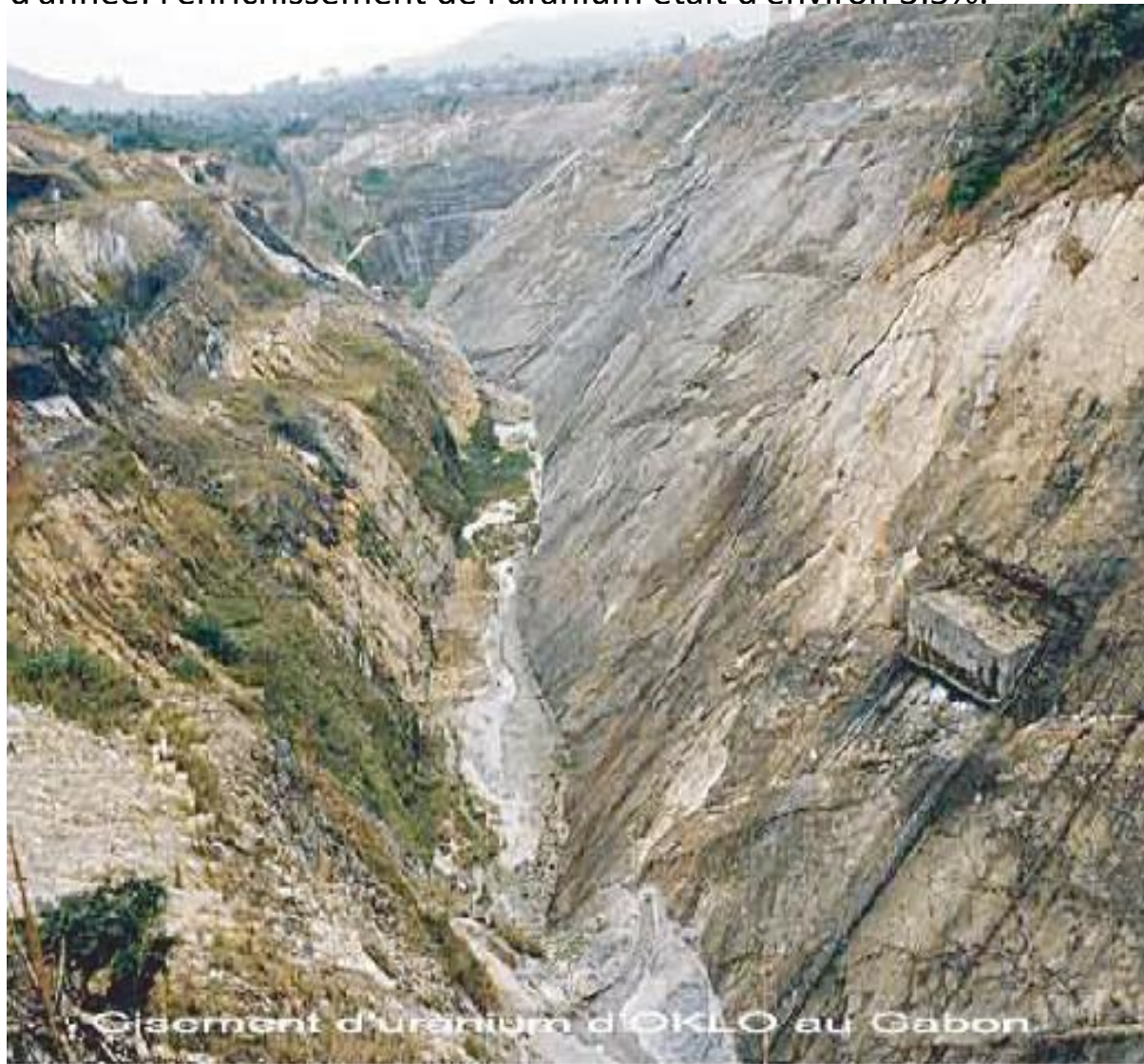
- L'eau dans les réacteurs est indispensable pour :
 - Refroidir le combustible
 - Ralentir les neutrons

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



Réacteur naturel d'Oklo

Il y a deux milliards d'année. l'enrichissement de l'uranium était d'environ 3.5%.



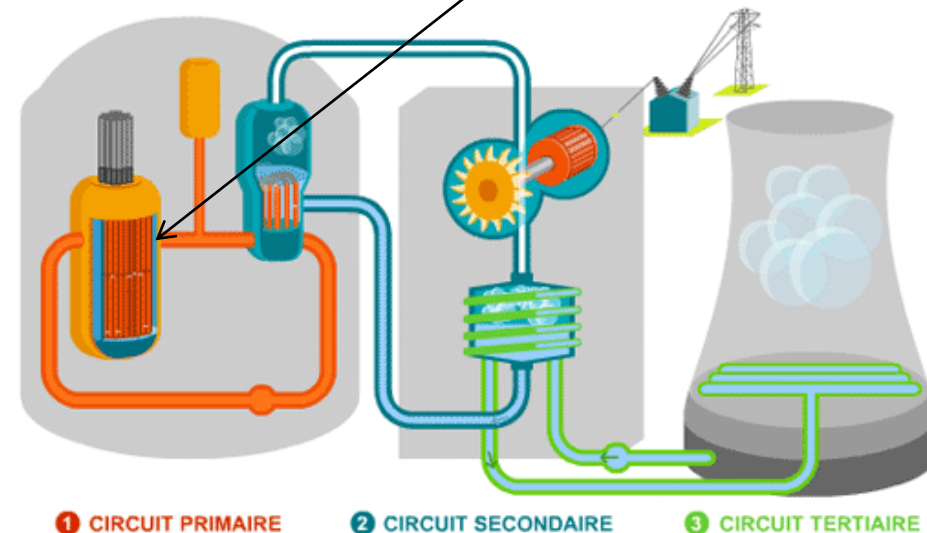
La puissance moyenne était d'environ 100kW
Formidable retour d'expérience sur la migration des radionucléides

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



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

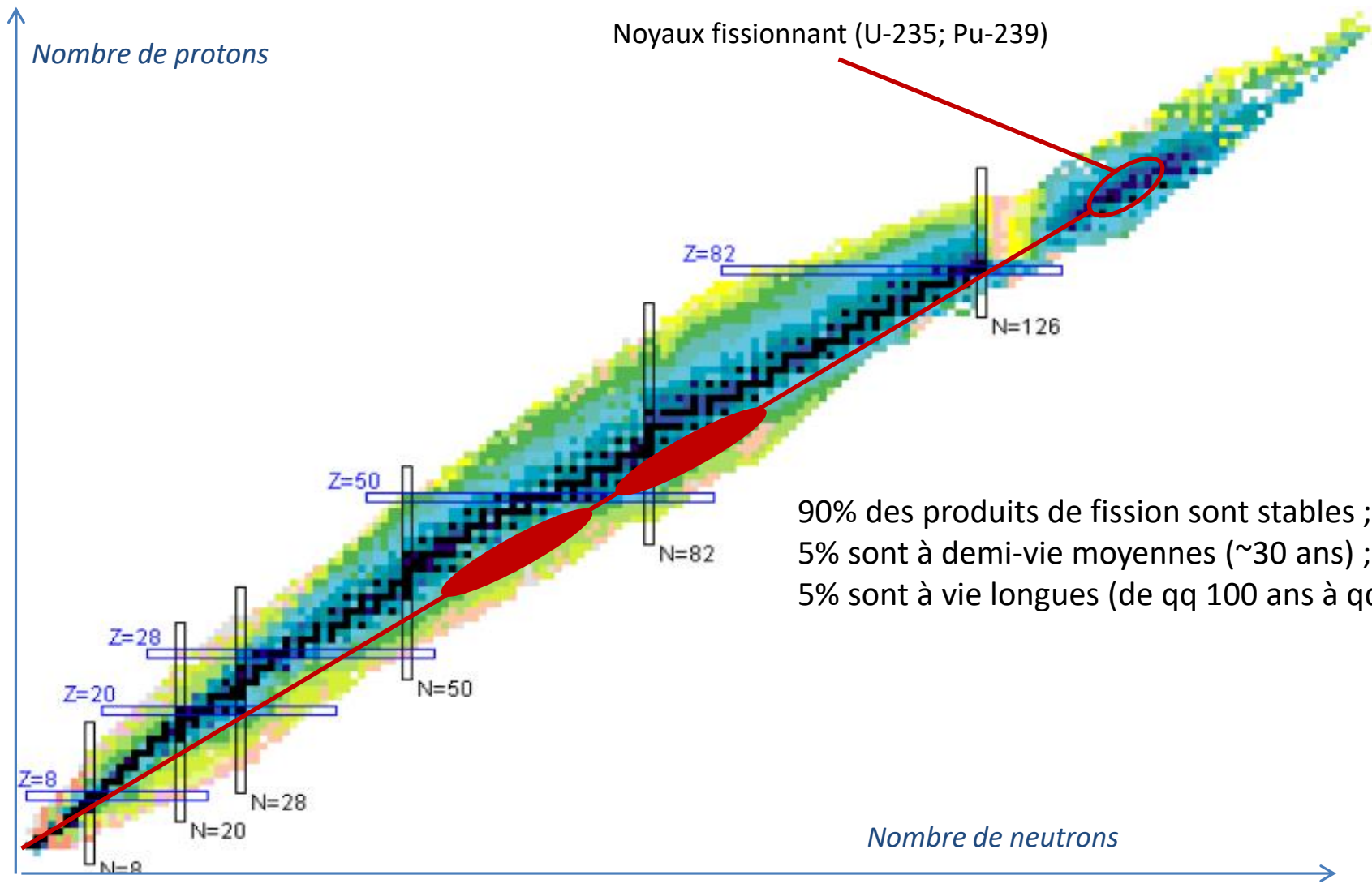
L'intérêt de la stratégie française

3/ Les ressources en uranium naturel

4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

Conclusions

La fission



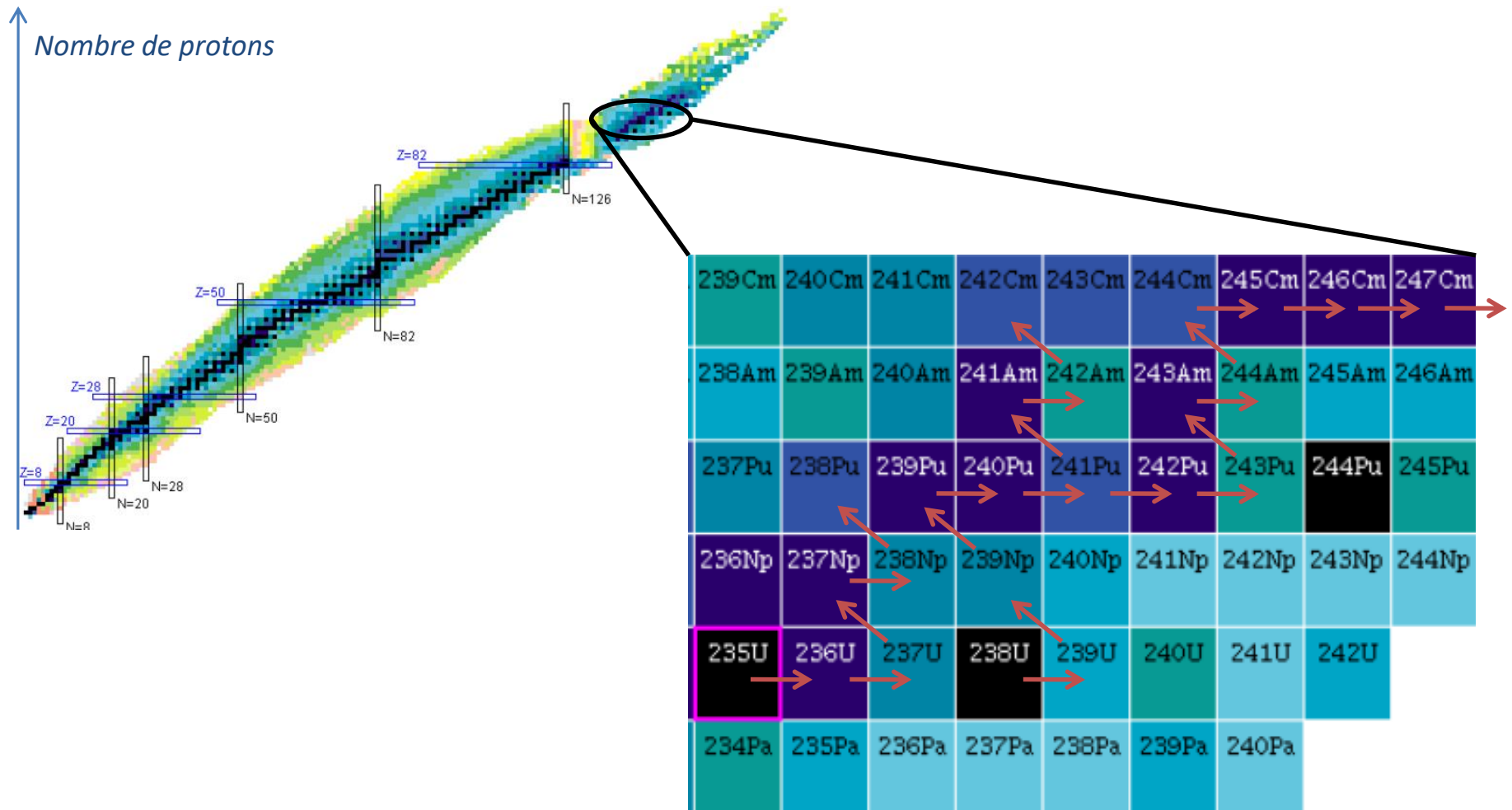
Noyaux fissionnant (U-235; Pu-239)

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

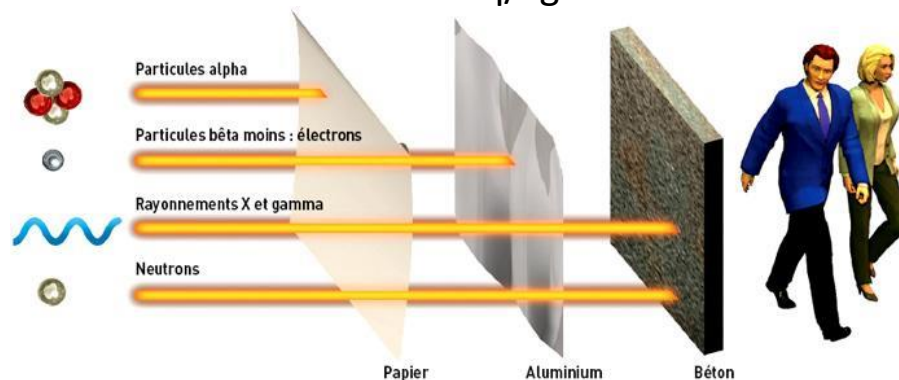


L'irradiation produit des noyaux lourds par captures neutroniques :

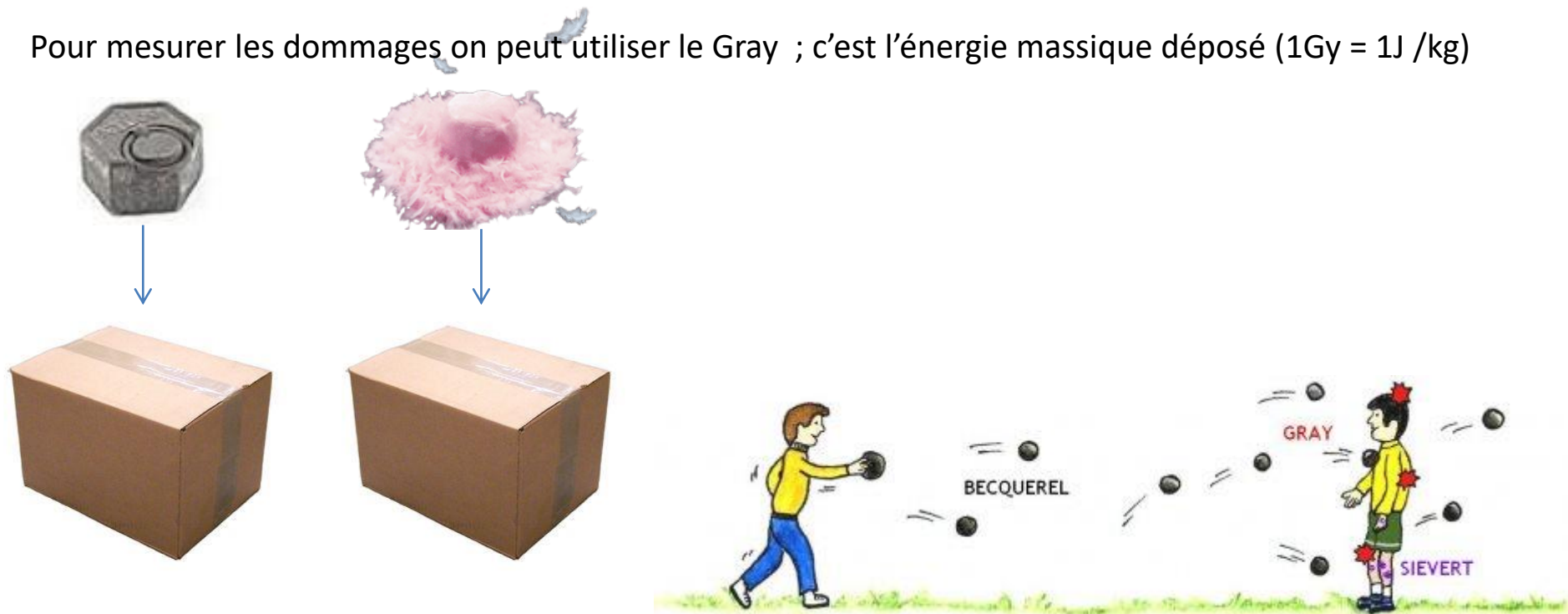
- Le plutonium est produit par capture sur l'238U
- Les autres éléments sont les actinides mineurs !

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 (radiotoxicité) !

La radioactivité c'est dangereux !

Effet directs à haute dose :

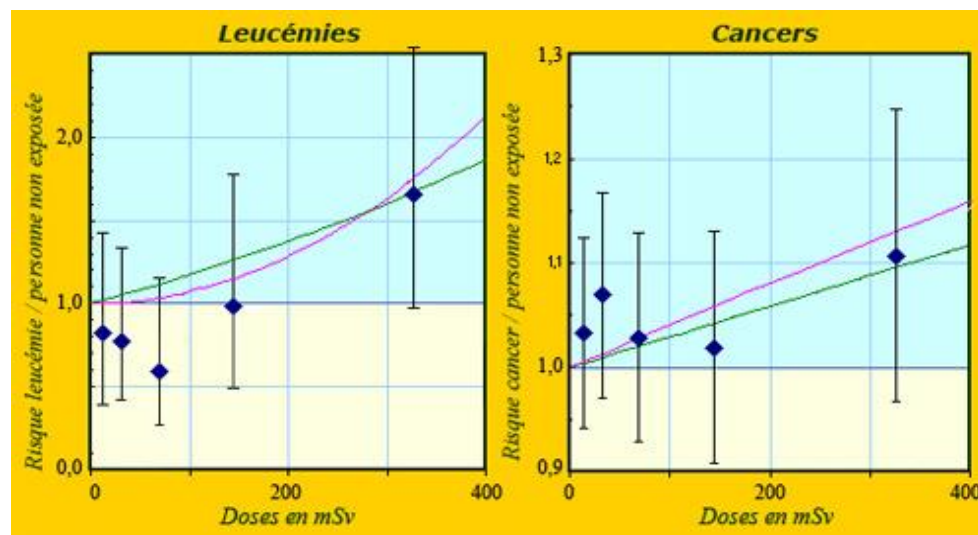
- 40 Sv : Destruction des cellules nerveuses : coma et mort
- 20 Sv : Seuil des brûlures
- 10 Sv : Nausée, vomissement : hémorragie digestive létal

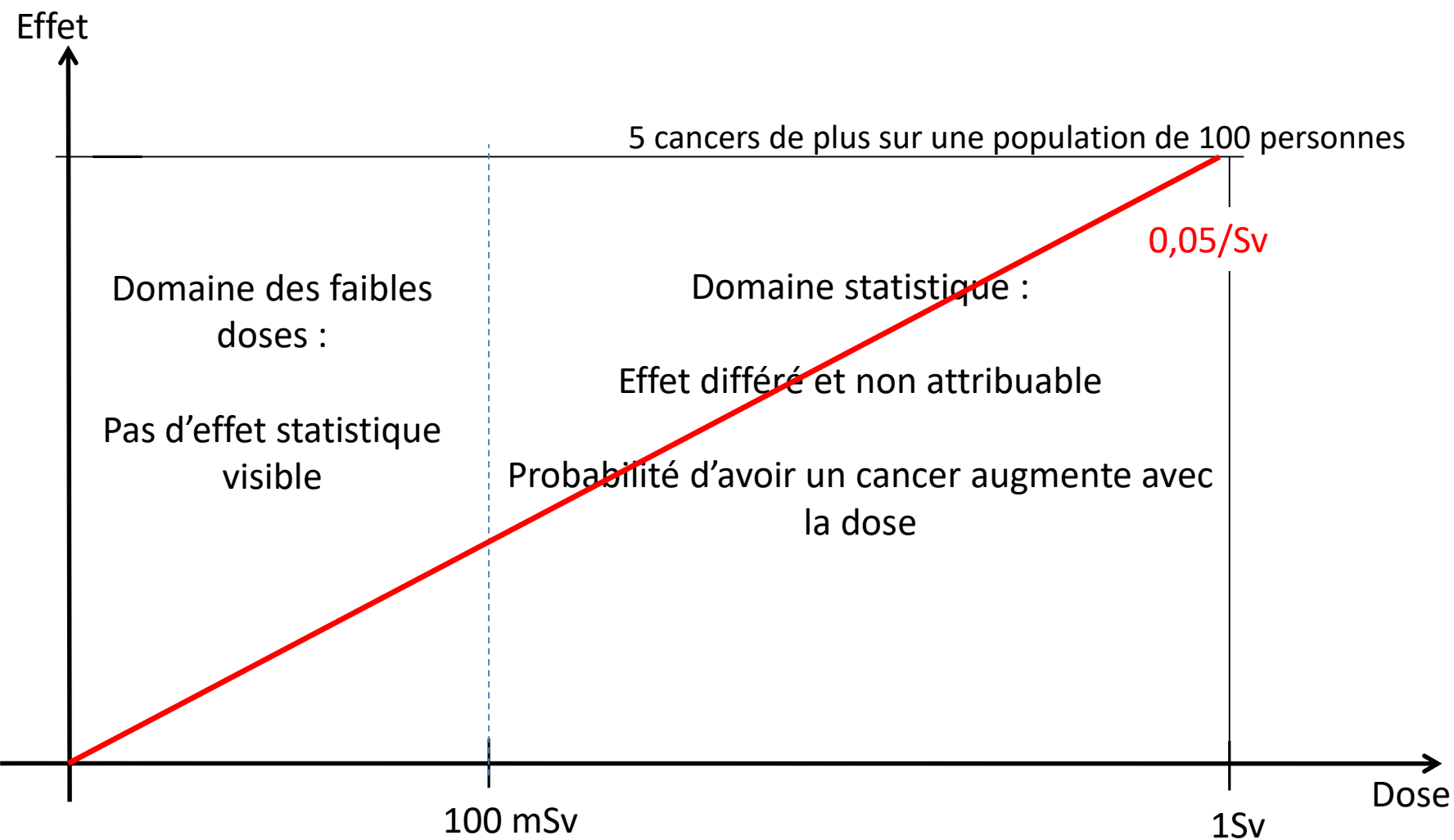
Tchernobyl > 47 morts directs en 1 mois suite à l'irradiation

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

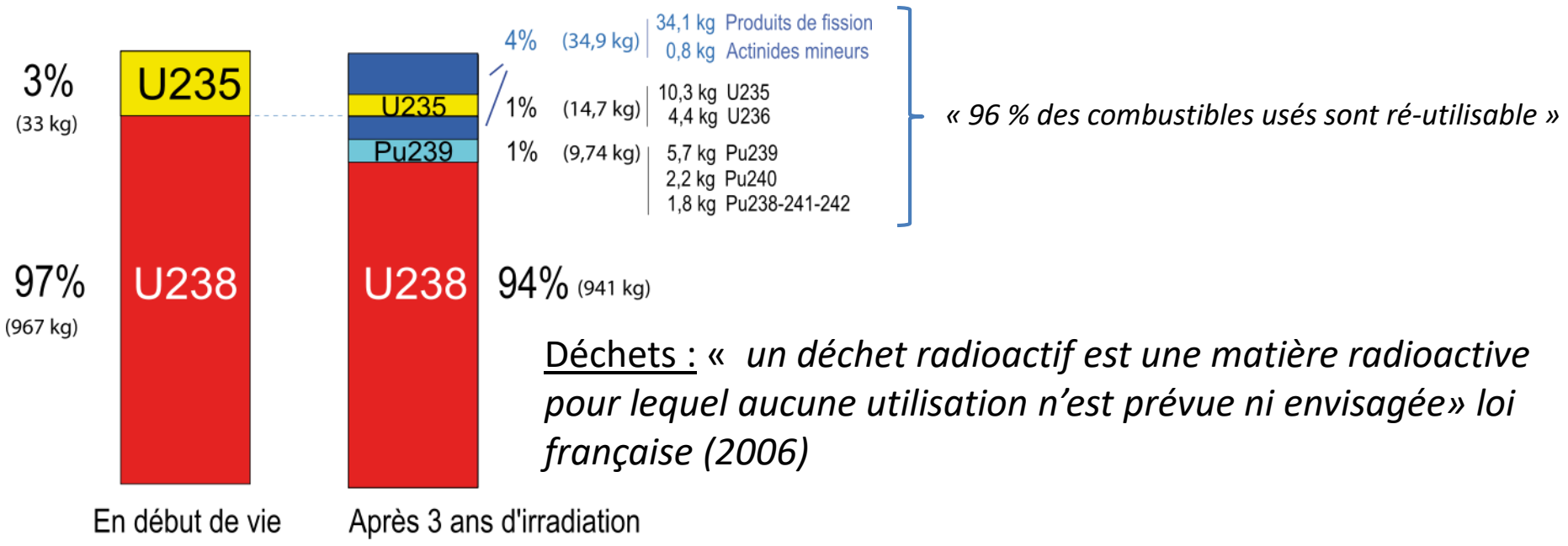
Etude sur les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki



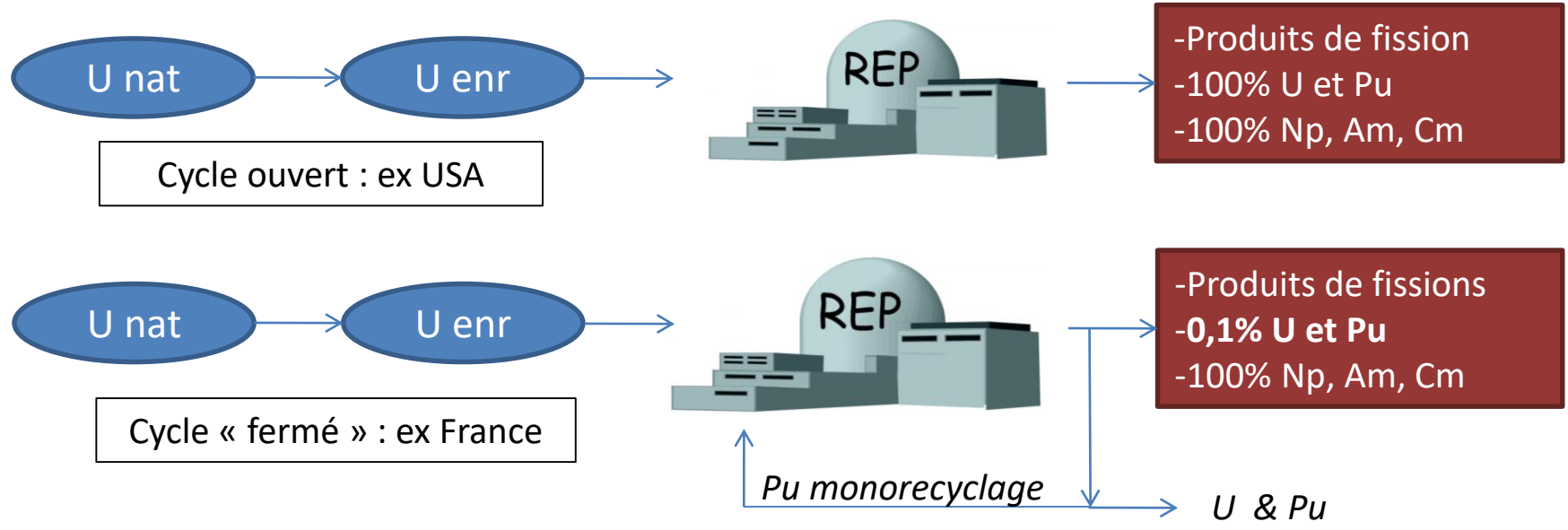


La commission internationale de protection radiologique (CIPR) fait l'hypothèse que l'effet reste proportionnel à la dose

Déchets nucléaires



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



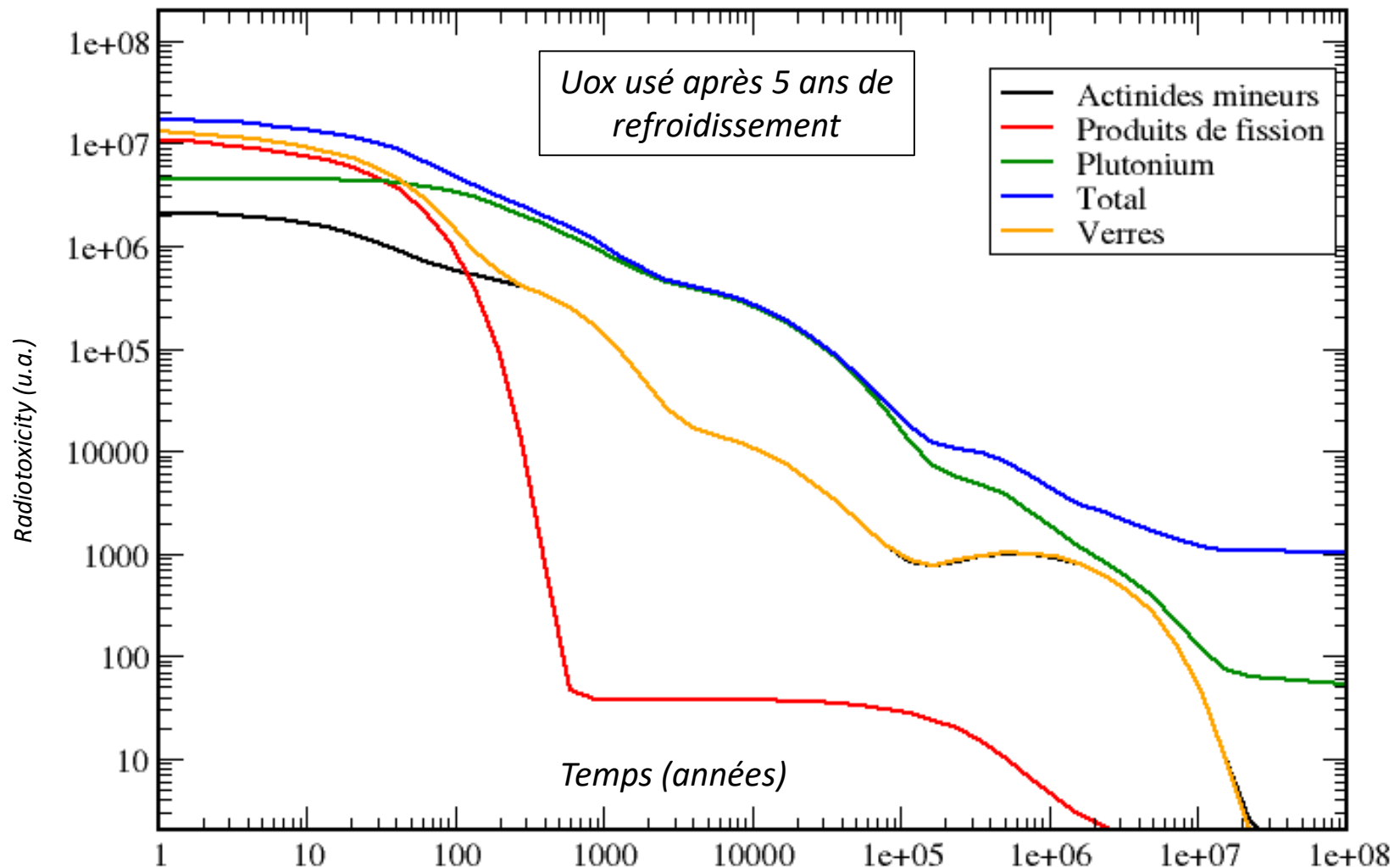
Comment qualifier les déchets nucléaires ?

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

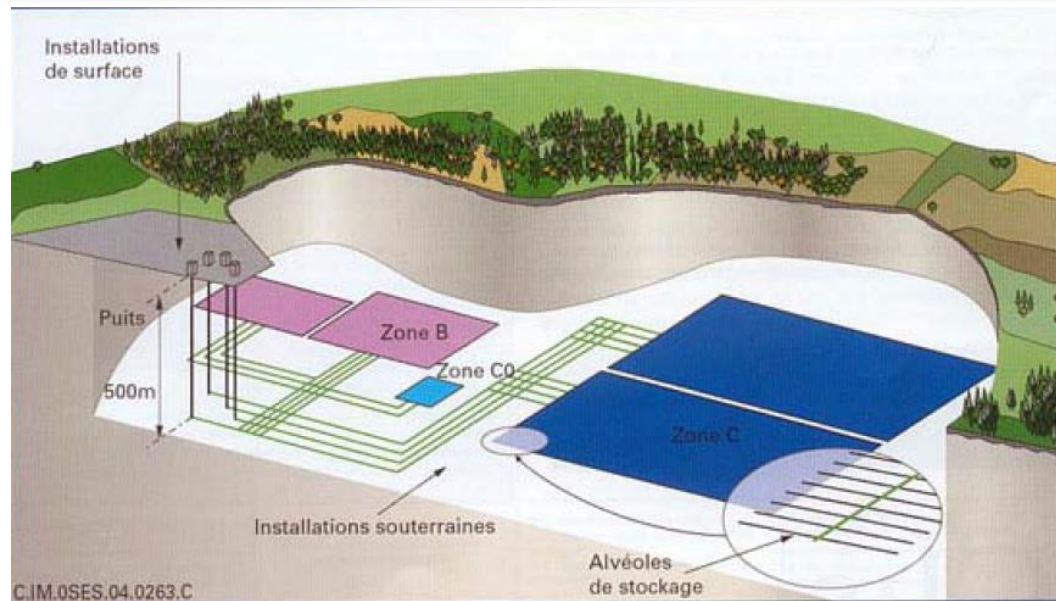
Le sievert est une unité construite pour quantifier les dommages des radiations sur le corps humain

→ 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

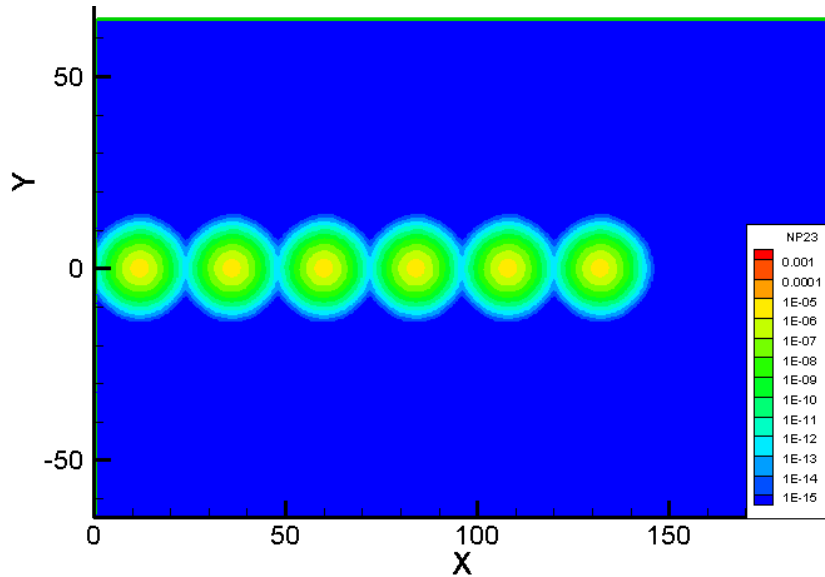


Deux types de déchets à vie longue

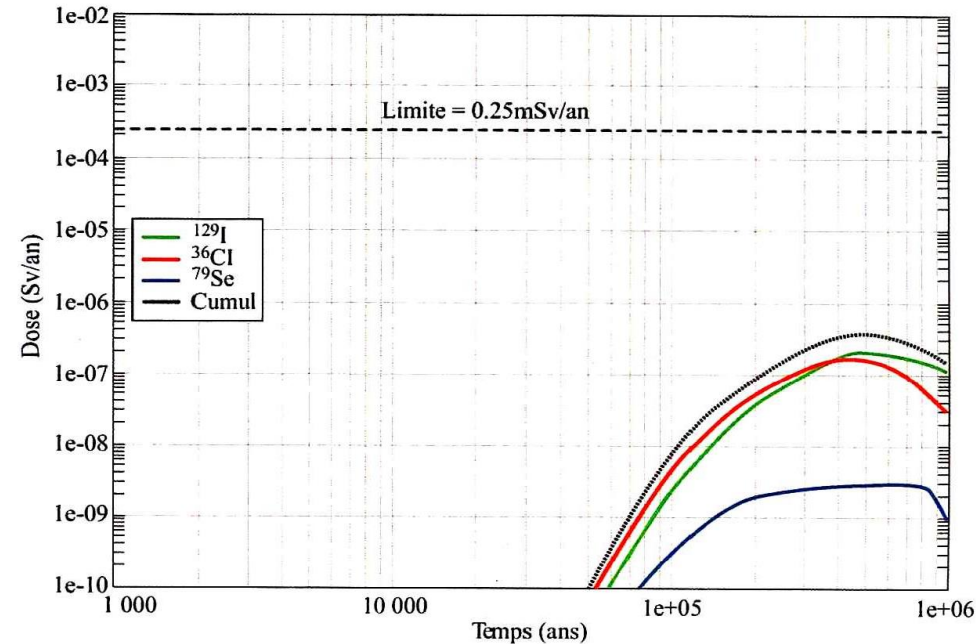
- Haute activité
- Moyenne activité



Est-ce sur ?



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



Dose maximale à la surface du au stockage

PROJET CIGÉO

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

LE DOSSIER DU MAÎTRE D'OUVRAGE
DÉBAT PUBLIC DU 1^{er} MAI AU 1^{er} OCTOBRE 2013

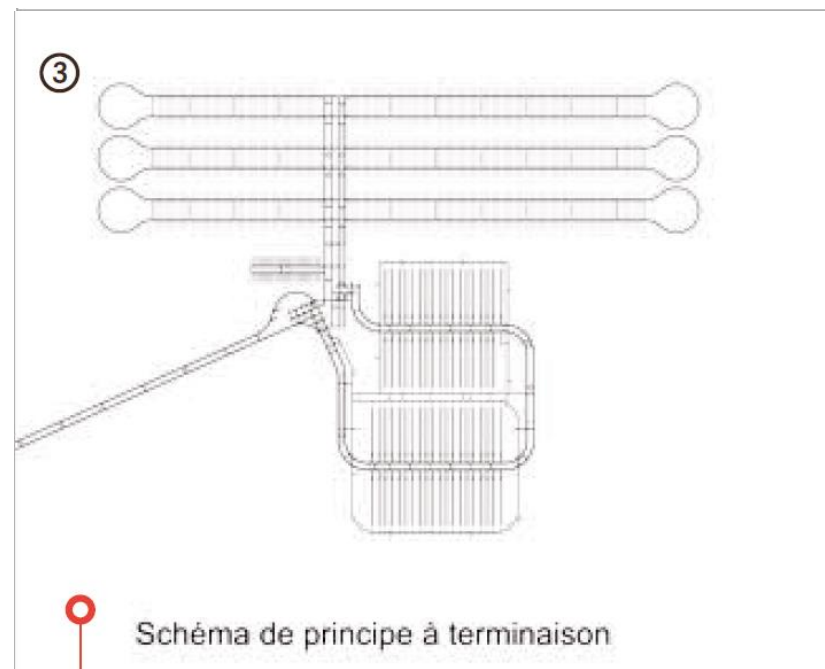


L'inventaire de CIGEO :

	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 !

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

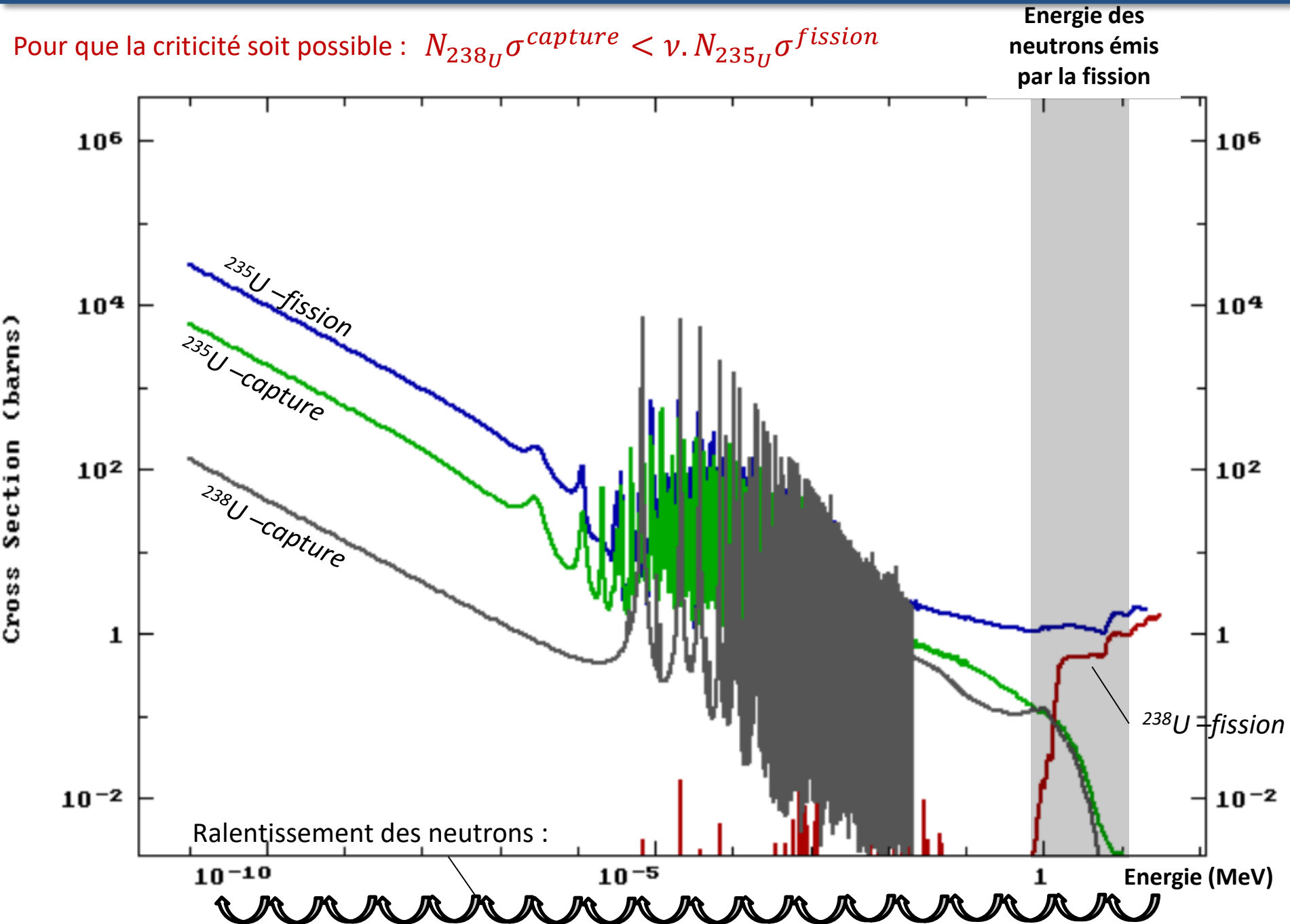
Partie II

Animation Vera Rubin
Rencontre des deux infinis
15 - 26 juillet 2019

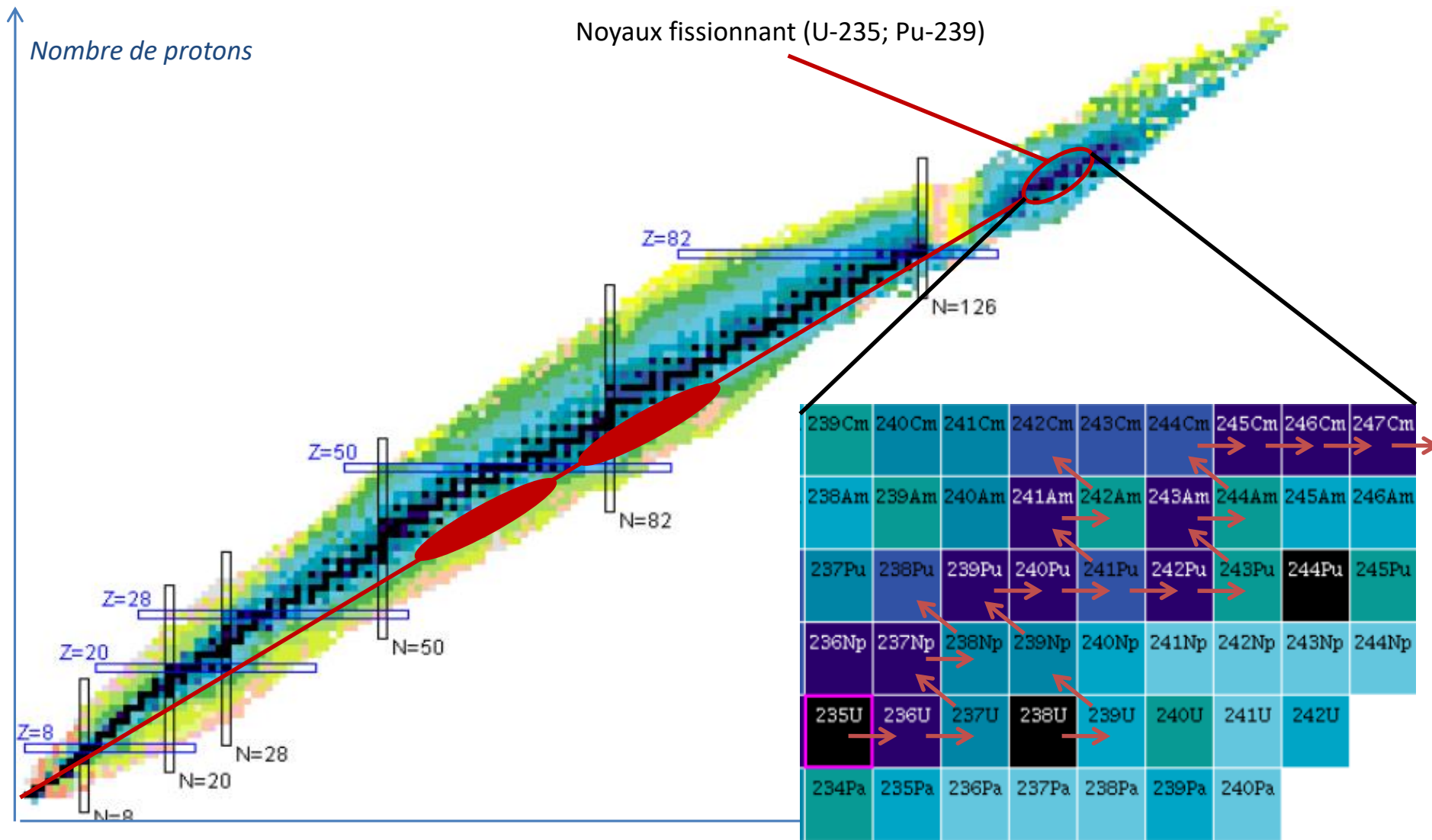
Xavier Doligez
Institut de physique nucléaire d'Orsay
doligez@ipno.in2p3.fr

Quelques rappels importants

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



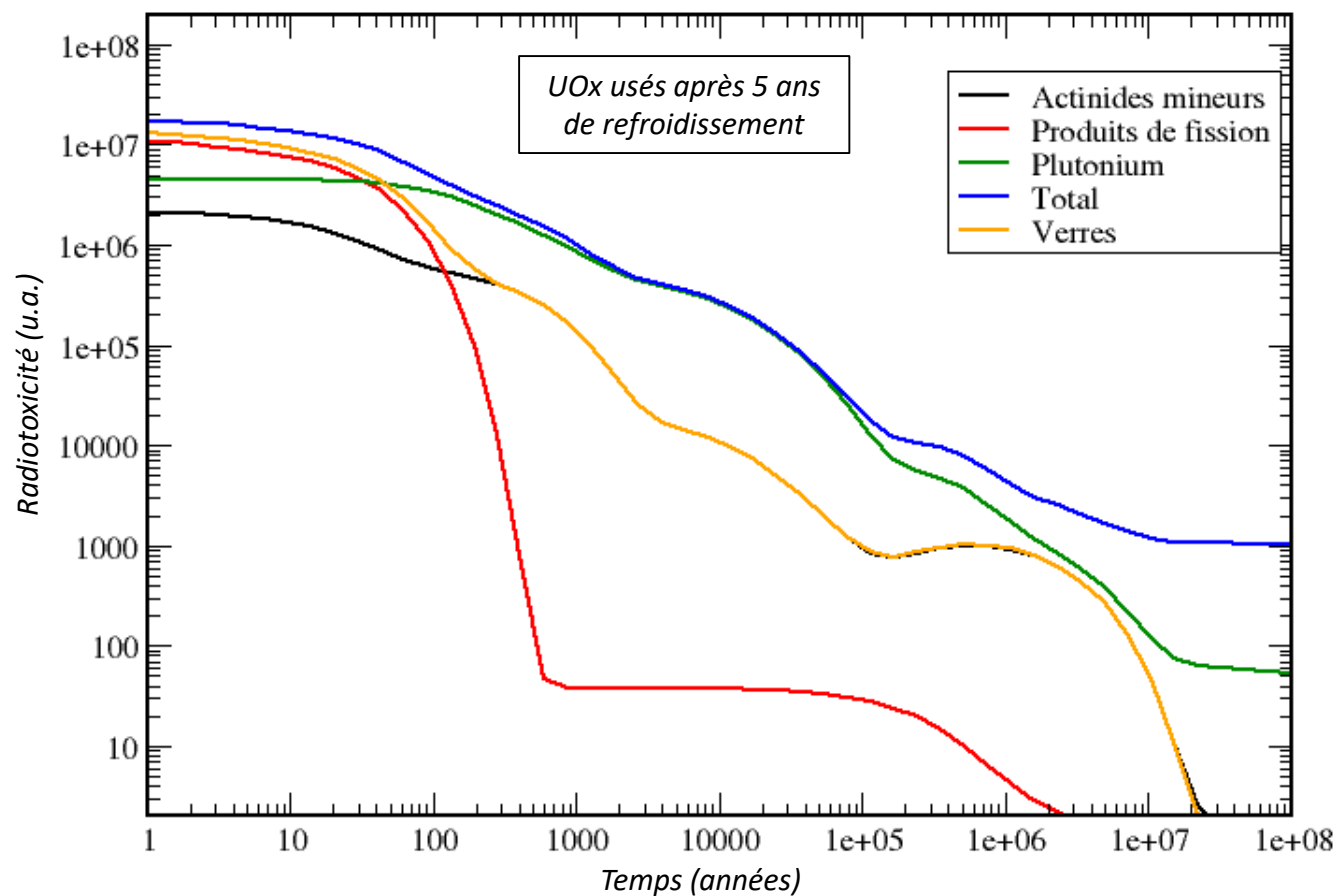
Quelques rappels importants



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

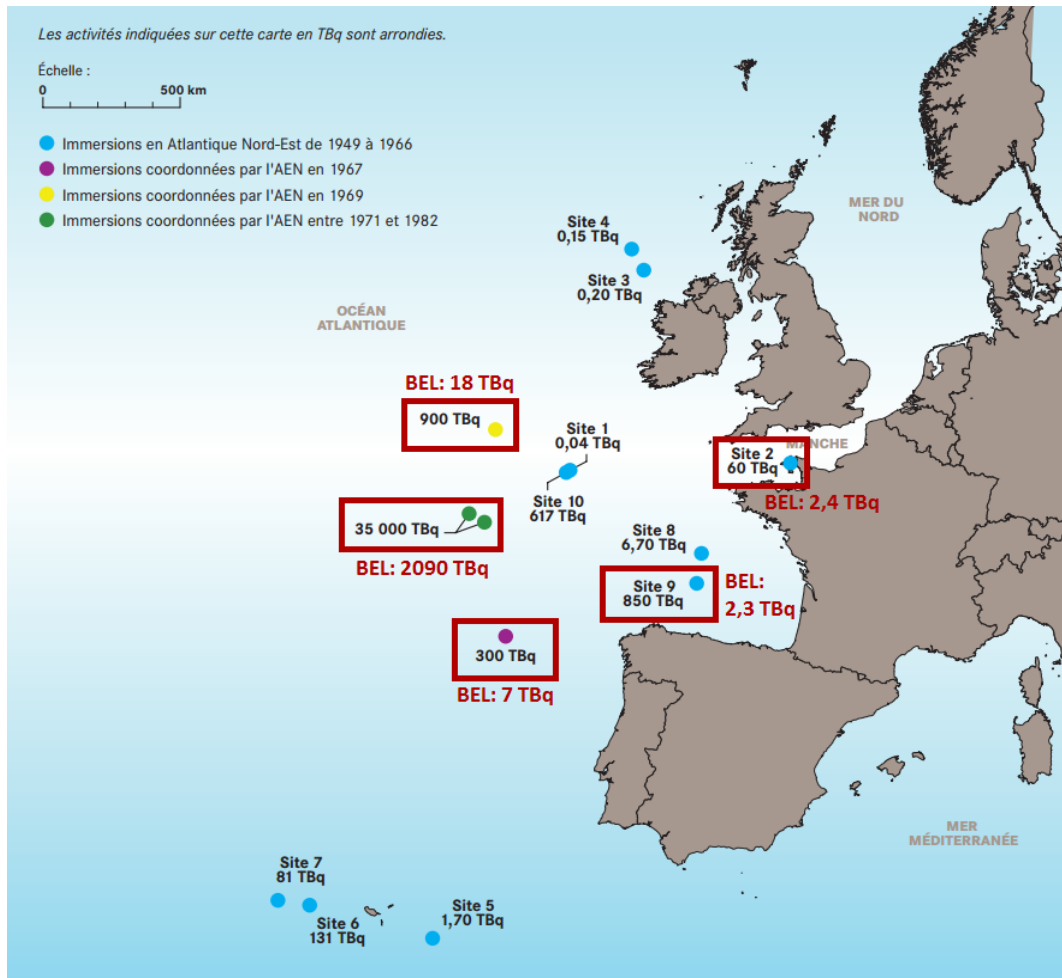
Considérez vous le Pu comme : déchet principal/matière précieuse

Rayer la mention inutile

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 ?

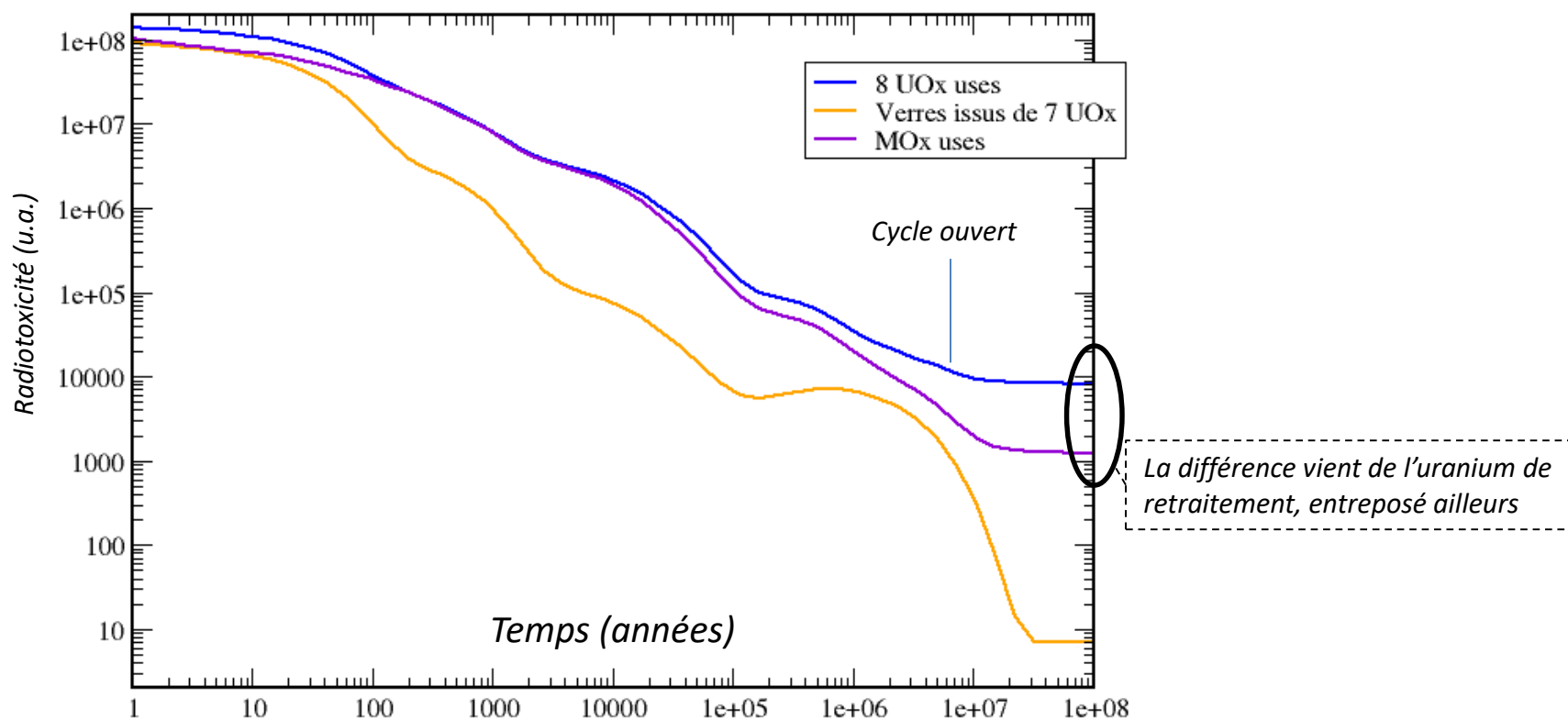
Le plutonium peut être utilisé comme matière fissile pour remplacer l'uranium 235.

→ Utilisation des combustibles Mox pour économiser l'uranium

→ Incinération du plutonium pour faire 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%

1/Physique nucléaire et physique des réacteurs

2/ Les déchets nucléaires

3/ Les ressources en uranium naturel

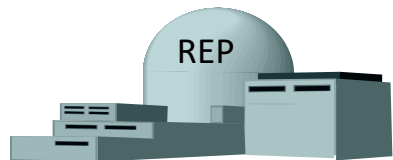
La valorisation du plutonium

Les réacteurs de la quatrième génération sont-ils indispensables ?

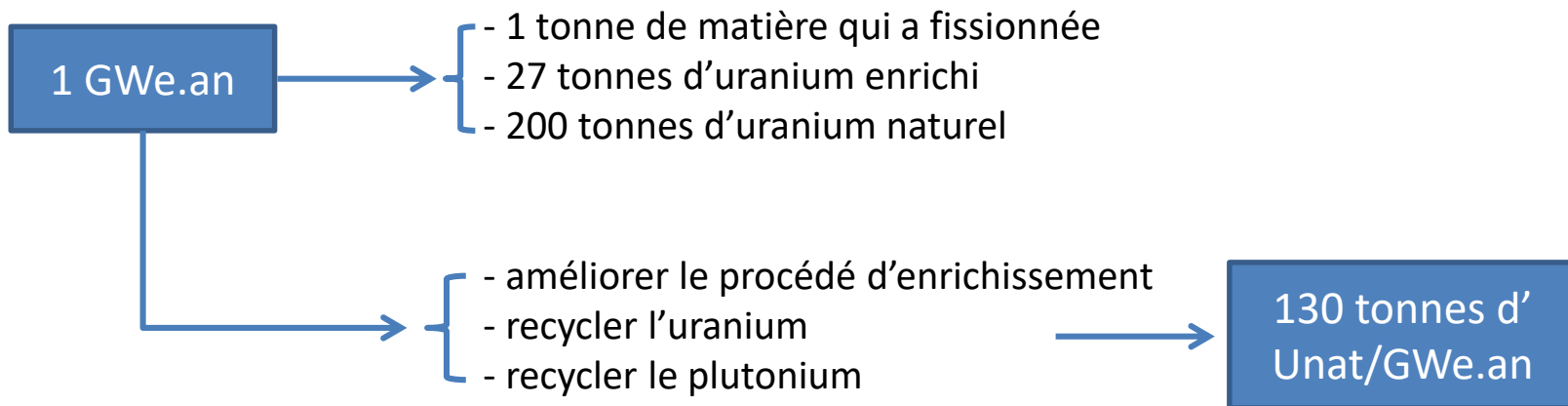
4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

Conclusions

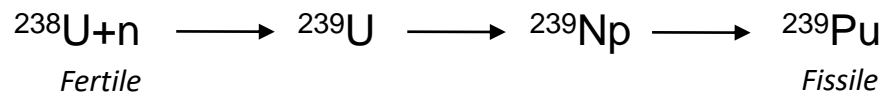
La valorisation du plutonium



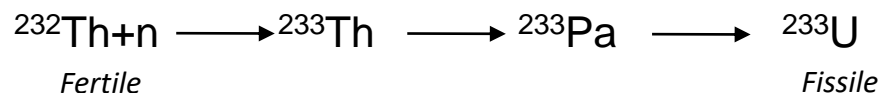
Basé sur l'utilisation de l' ^{235}U (0,7% de l'uranium naturel)



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

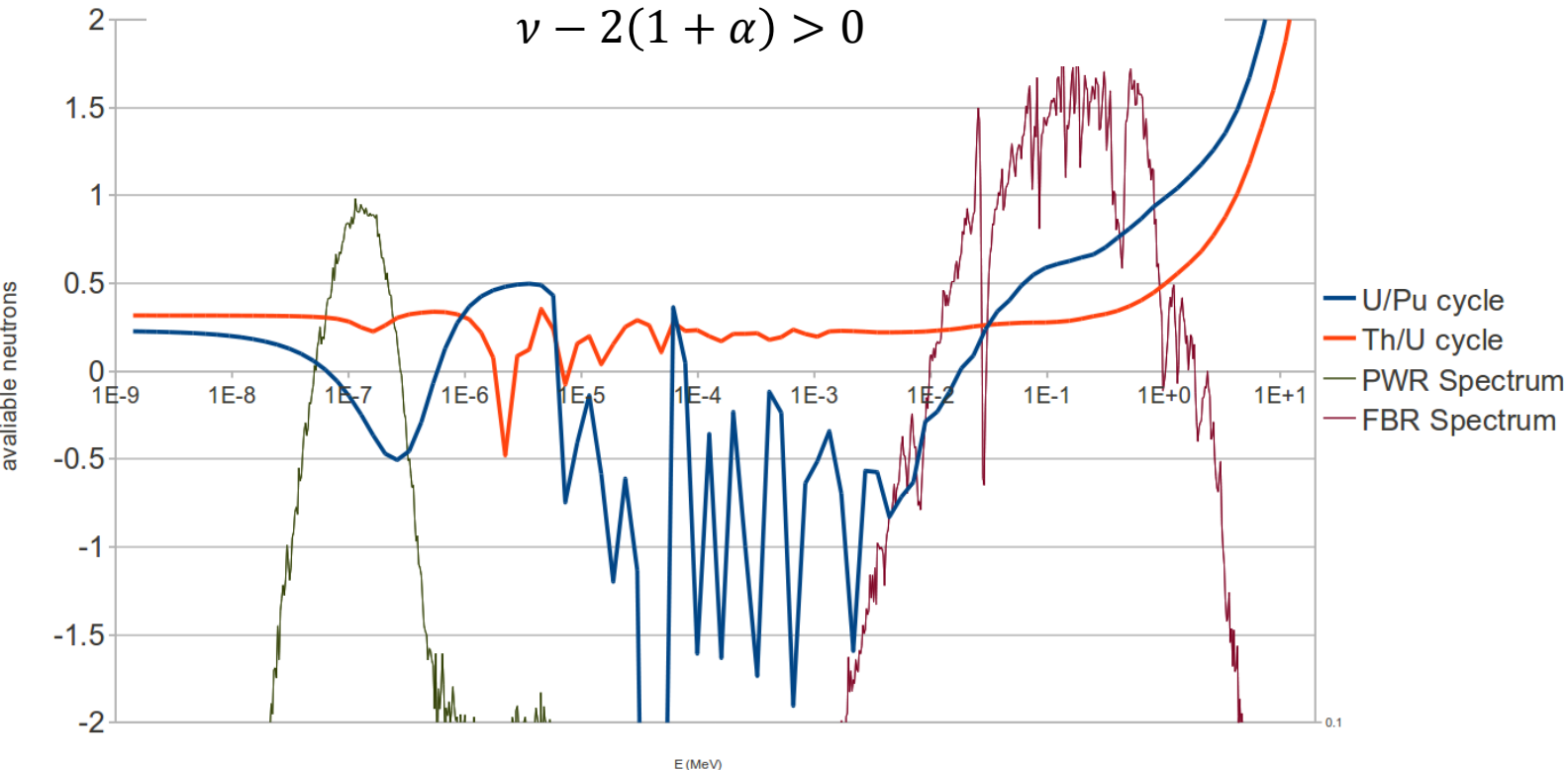
$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$ est le nombre de neutron
capturé pour une fission

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

Il faut produire $1 + \alpha$ noyau fissile

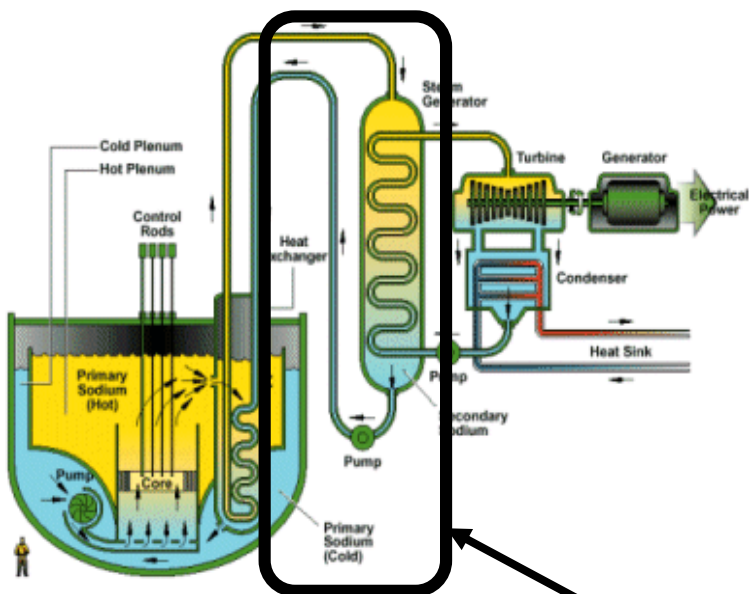
Pour que la régénération soit possible il faut que :

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



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

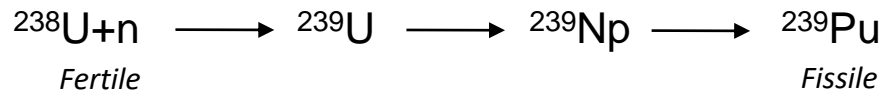
- Nécessite un échangeur supplémentaire pour les générateurs de vapeurs

➤ 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

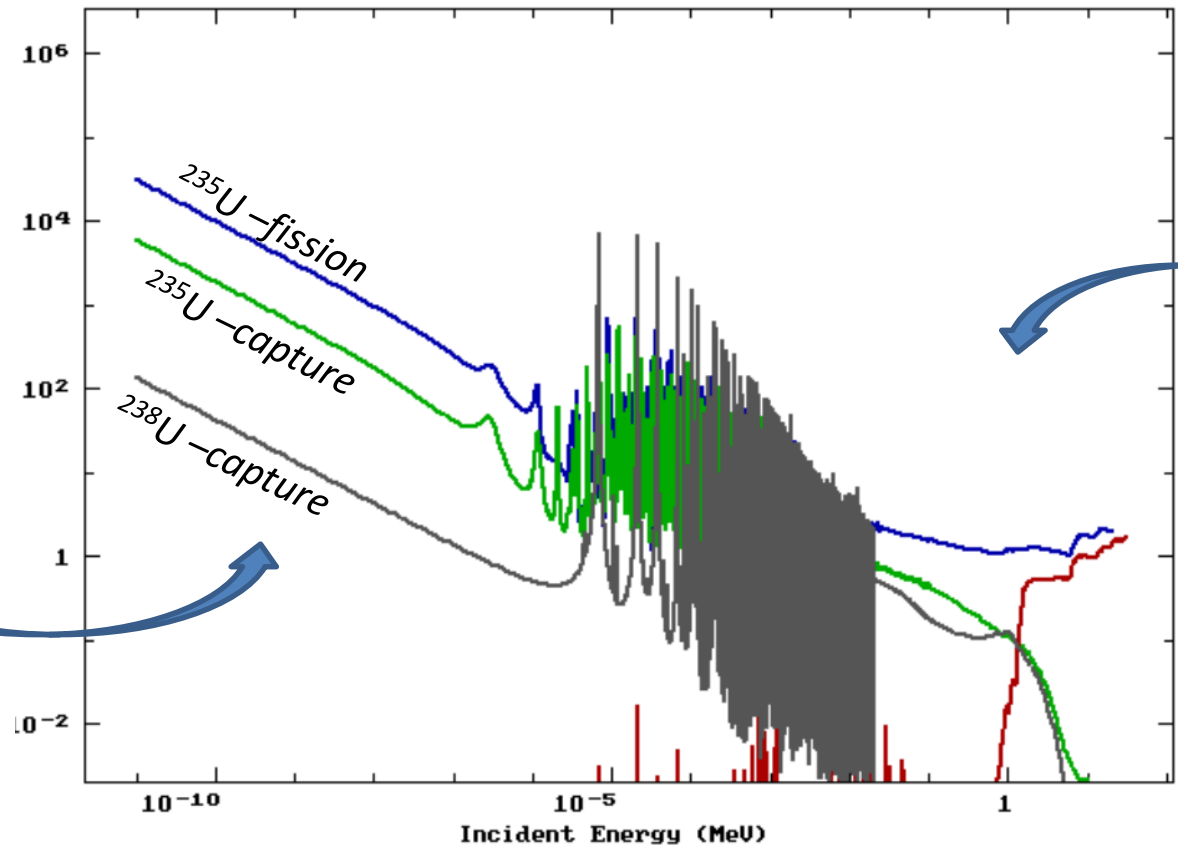


Les **réacteurs à neutrons rapides** ont besoin de **plutonium** pour **démarrer**

→ 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

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



Inventaire initial
d'un RNR Sodium

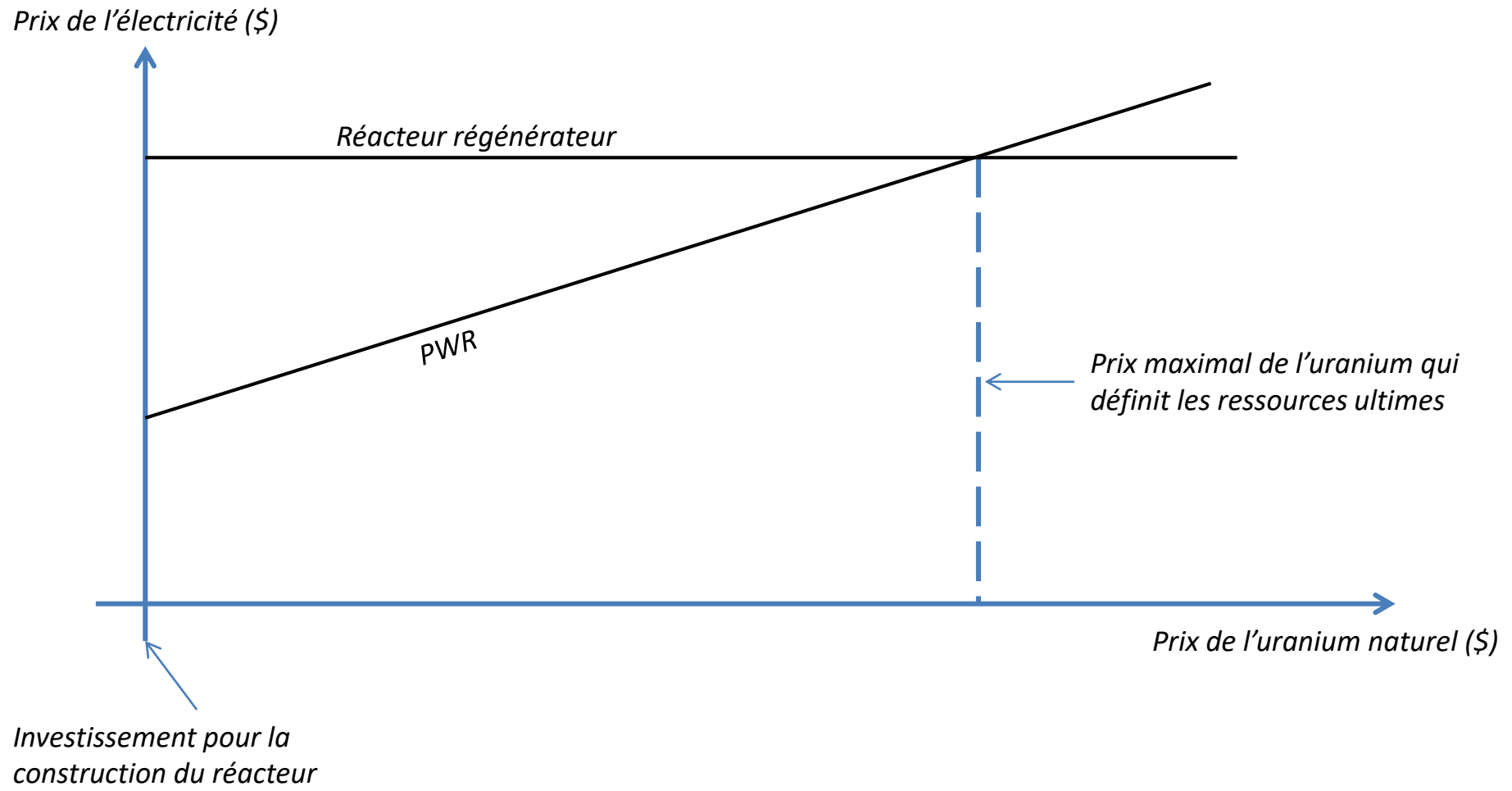


12 t
de Pu

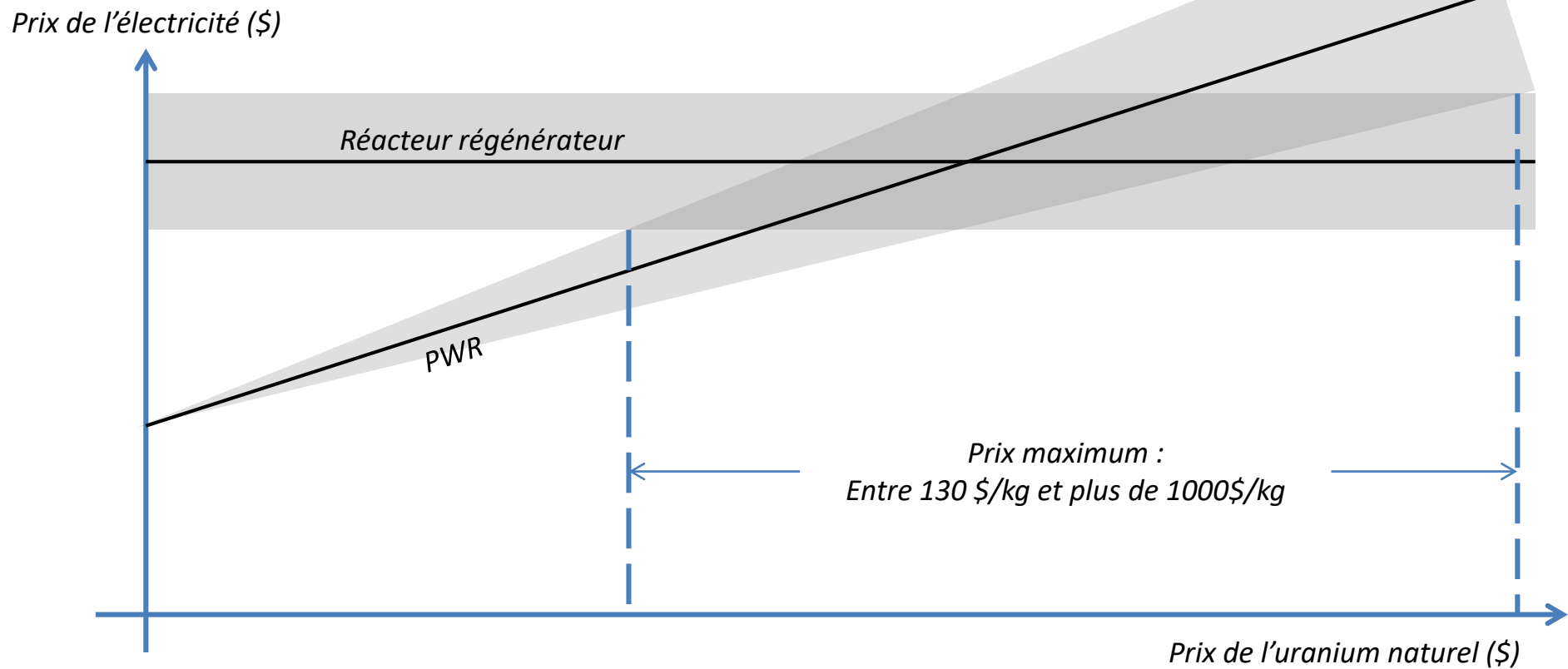


Un REP produit
en 50 ans

Intérêt économique d'un changement de technologie



Et avec les barres d'erreurs



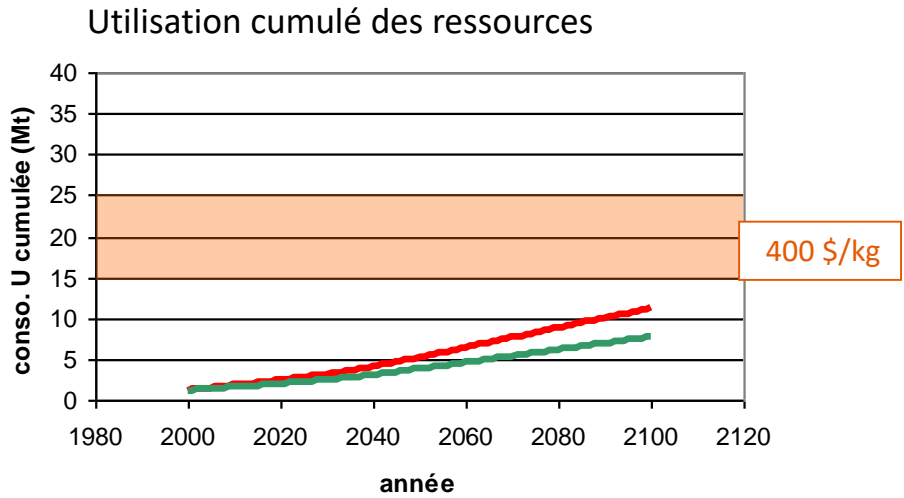
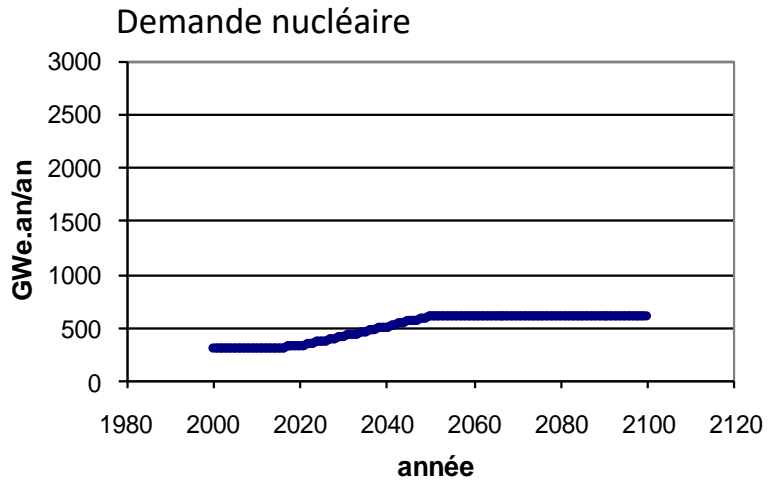
Aujourd'hui : 285 GWe (équivalent pleine puissance)
→ 60 000 tonnes d'uranium naturel consommé par an

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

Ressources d'uranium contre demande nucléaire

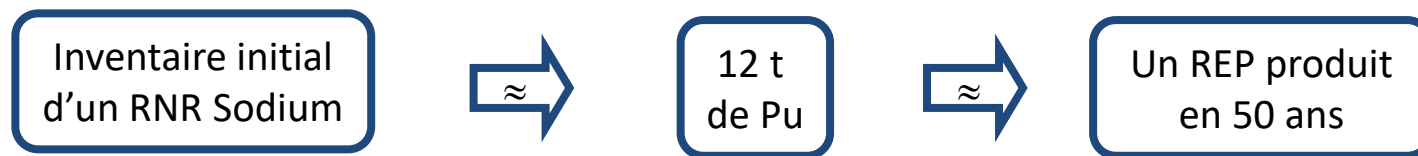
	millions of tons	
Réserves prouvées	< 80\$/kg	2.5
	< 130\$/kg	4.4
Ressources ultimes estimées	AIEA	16
	Extrapolation linéaire « reserves vs. prix » à 400\$/kg (ref JF. Luciani, CEA)	23

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



— 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

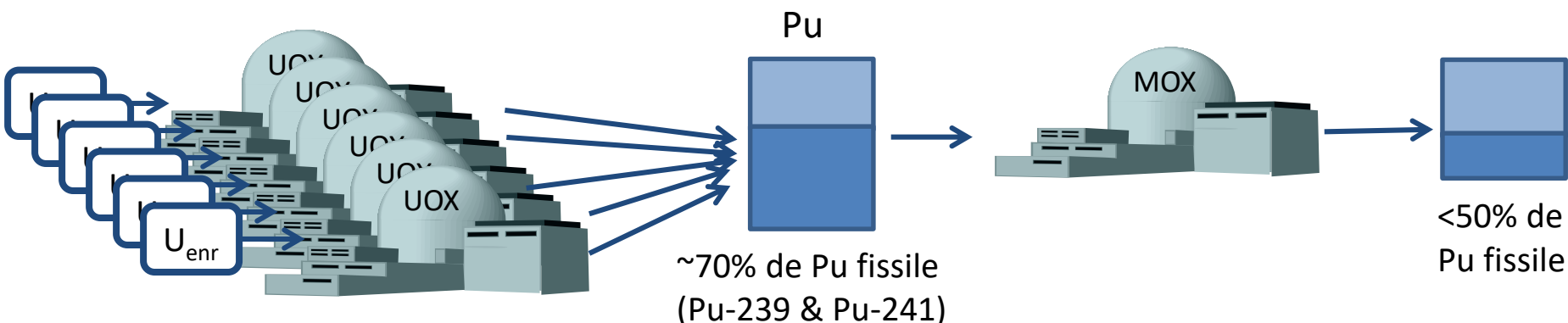
Si on a besoin rapidement des RNR (avant 2100), il faut économiser le plutonium

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*



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

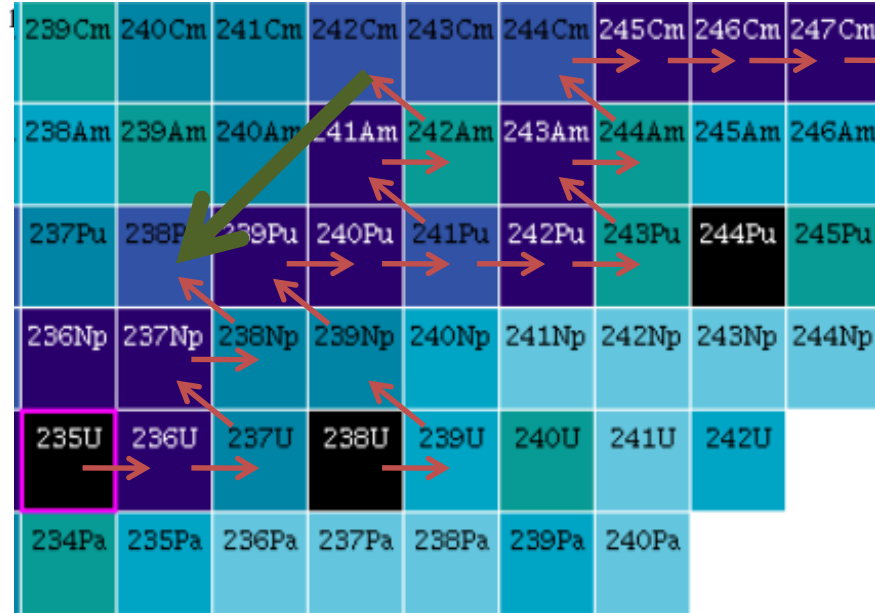
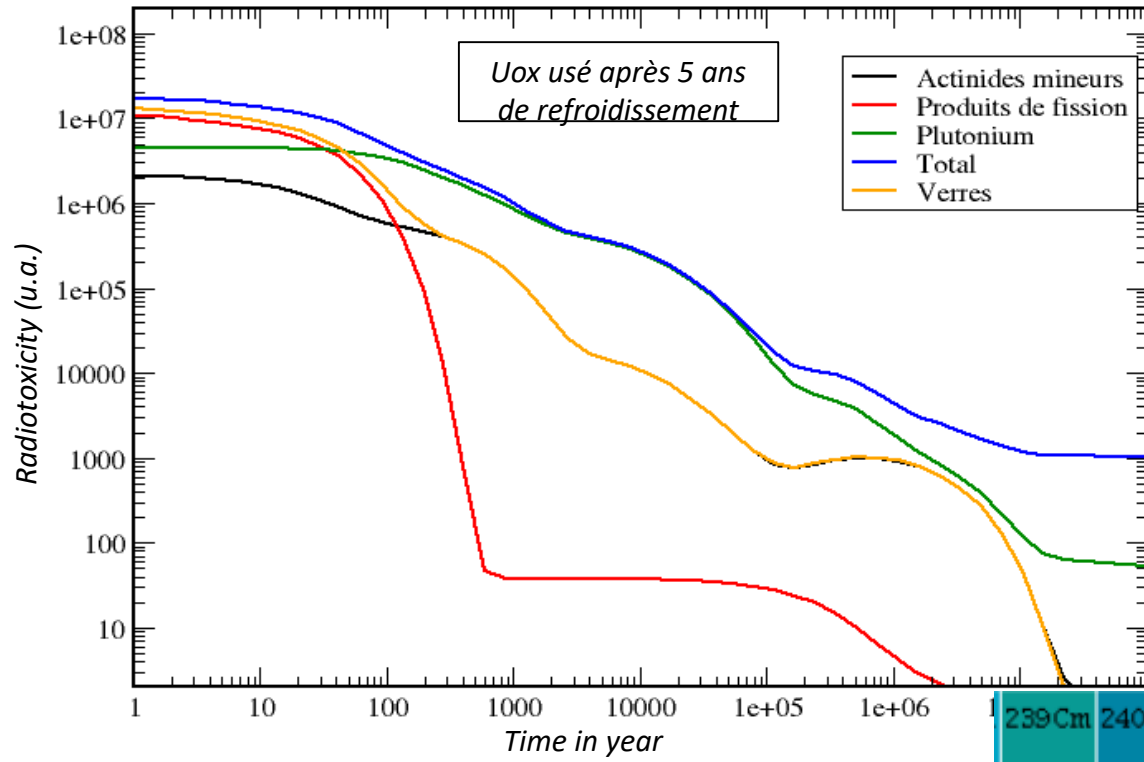
4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

Qu'est ce que c'est ?

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

Conclusions

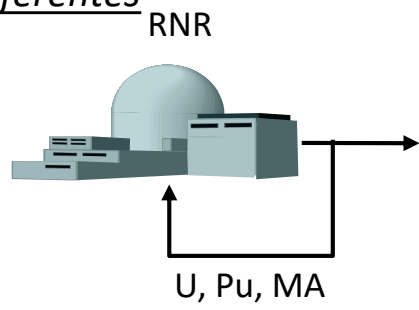
La transmutation : qu'est ce que c'est ?



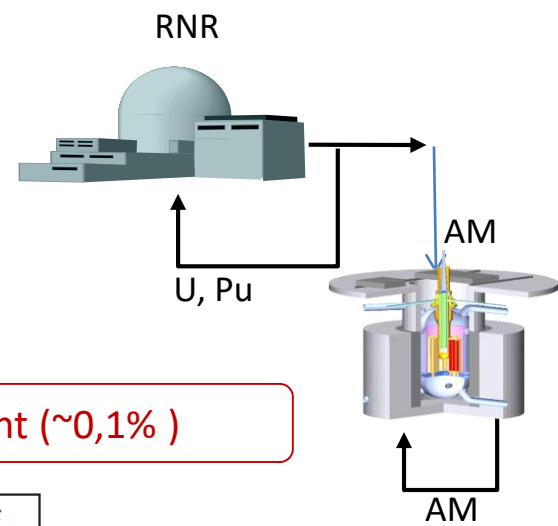
Transmutation des actinides mineurs

Deux stratégies différentes

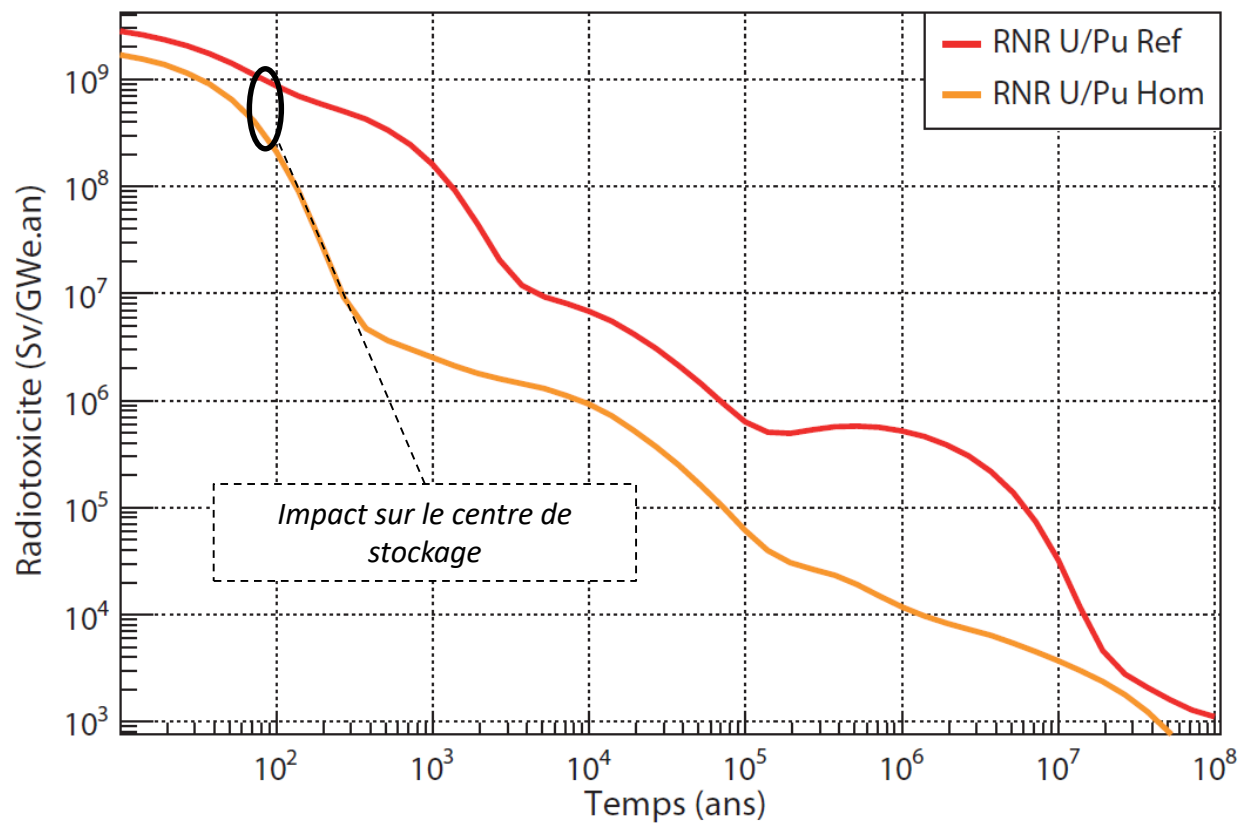
➤ Dans RNR



➤ ADS → scénario double strate



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

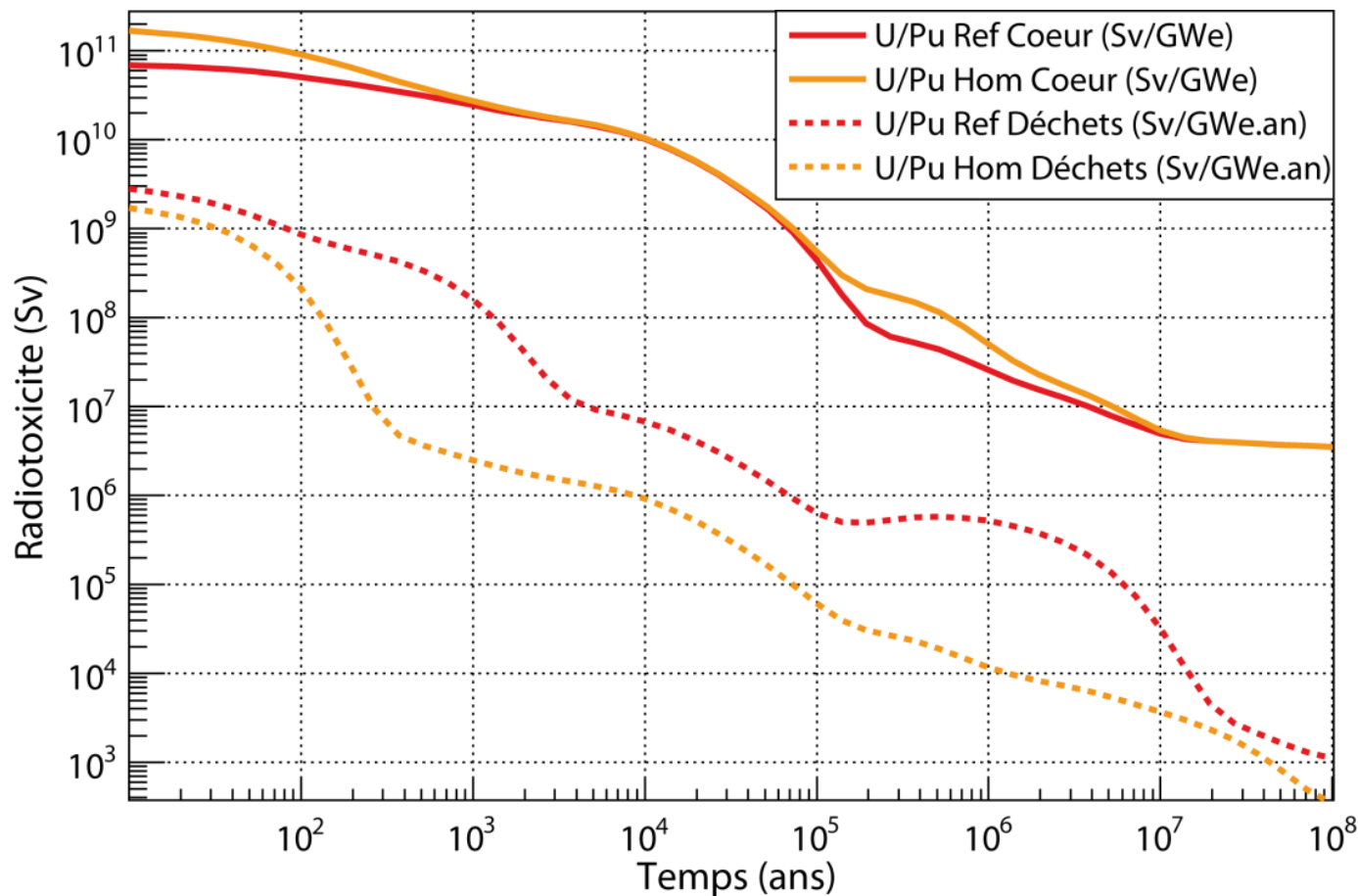


➤ Comparaison des déchets produits dans un RNR avec (jaune) et sans transmutation (rouge)

➤ 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



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 :

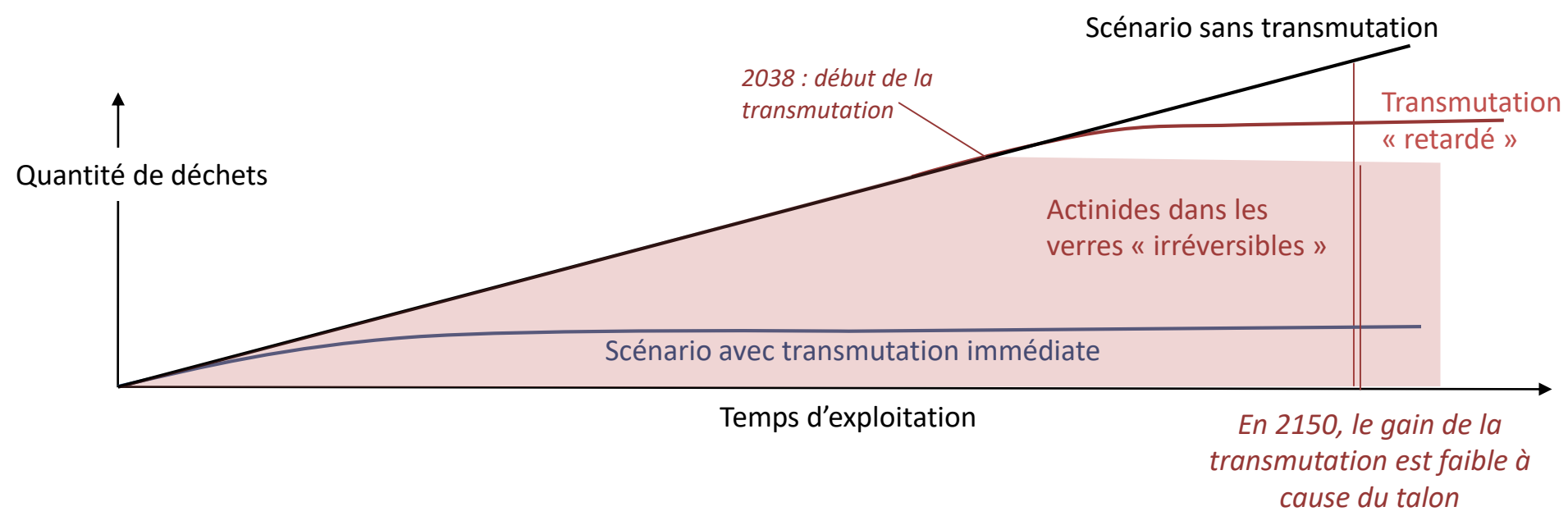
	Confiance dans la société	Oui	Non
Promoteur-nucléaire	Pour un développement durable du nucléaire	X	
	Pour la transmutation		X
« Anti-nucléaire »	Pour un développement durable du nucléaire		X
	Pour la transmutation et/ou entroposage	X	

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 ?

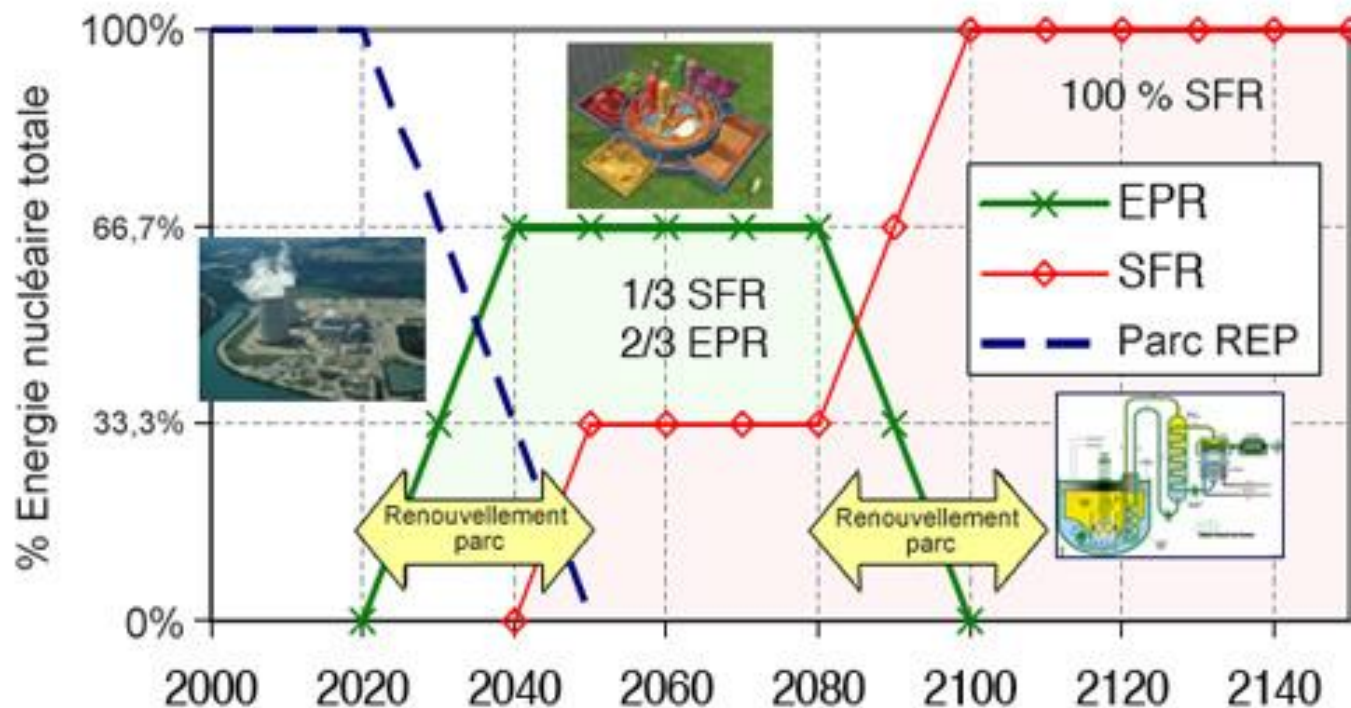
L'importance des scénarios pour les décisions

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)

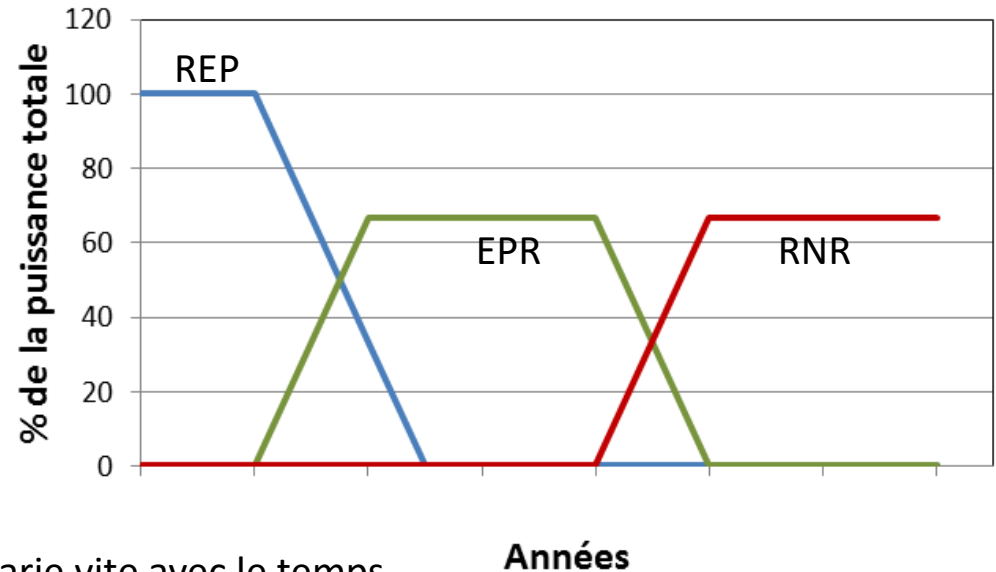
➤ Différents critères de comparaison

- 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)*

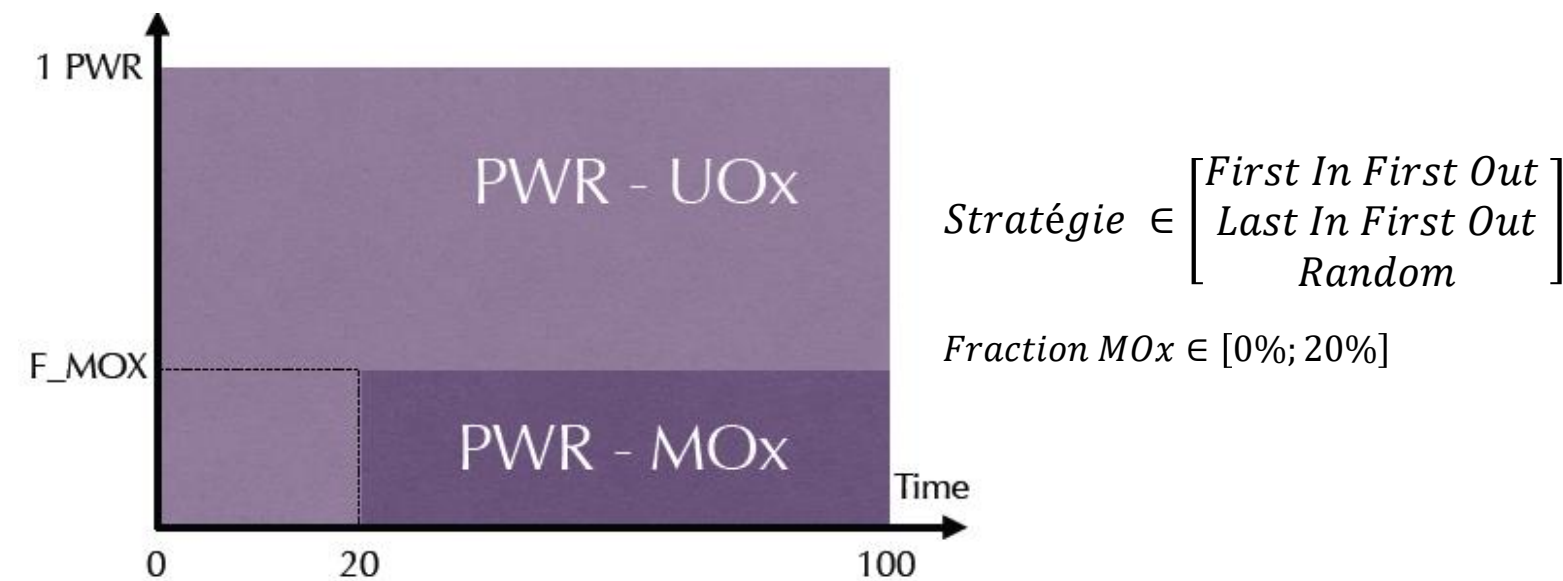
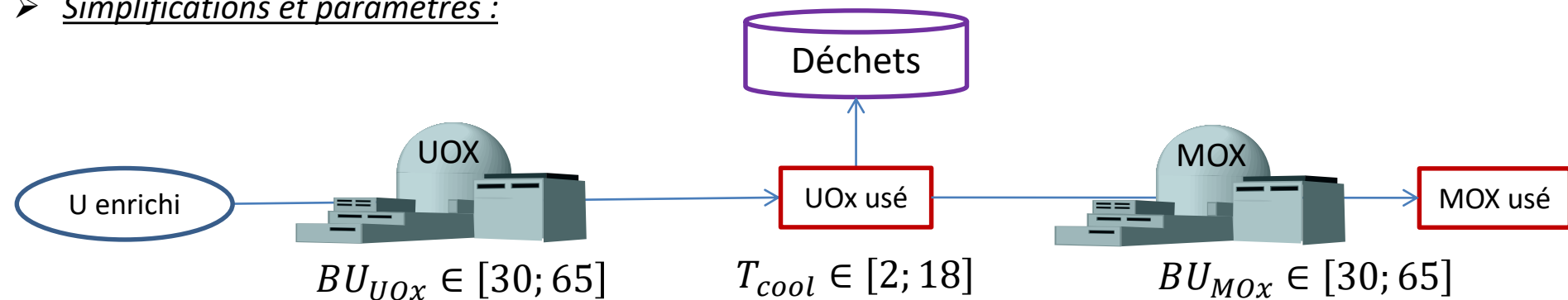
239Cm ≈2.9 H ε: 100.00% α < 0.10%	240Cm 27 D α > 99.50% ε < 0.50%	241Cm 32.8 D ε: 99.00% α: 1.00%	242Cm 162.8 D α: 100.00% SF: 6.2E-6%	243Cm 29.1 Y α: 99.71% ε: 0.29%	244Cm 18.1 Y α: 100.00% SF: 1.4E-4%	245Cm 8423 Y α: 100.00% SF: 6.1E-7%	246Cm 4706 Y α: 99.97% SF: 0.03%	247Cm 1.56E+7 Y α: 100.00%
238Am 98 M ε: 100.00% α: 1.0E-4%	239Am 11.9 H ε: 99.99% α: 0.01%	240Am 50.8 H ε: 100.00% α: 1.9E-4%	241Am 432.6 Y α: 100.00% SF: 4E-10%	242Am 16.02 H β-: 82.70% ε: 17.30%	243Am 7370 Y α: 100.00% SF: 3.7E-9%	244Am 10.1 H β-: 100.00%	245Am 2.05 H β-: 100.00%	246Am 39 M β-: 100.00%
237Pu 45.64 D ε: 100.00% α: 4.2E-3%	238Pu 87.7 Y α: 100.00% SF: 1.9E-7%	239Pu 24110 Y α: 100.00% SF: 3.E-10%	240Pu 6561 Y α: 100.00% SF: 5.7E-6%	241Pu 14.325 Y β-: 100.00% α: 2.5E-3%	242Pu 3.75E+5 Y α: 100.00% SF: 5.5E-4%	243Pu 4.956 H β-: 100.00%	244Pu 8.00E+7 Y α: 99.88% SF: 0.12%	245Pu 10.5 H β-: 100.00%
236Np 153E+3 Y ε: 86.30% β-: 13.50%	237Np 2.144E+6 Y α: 100.00% SF ≤ 2E-10%	238Np 2.117 D β-: 100.00%	239Np 2.356 D β-: 100.00%	240Np 61.9 M β-: 100.00%	241Pu 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% 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%	240U 14.1 H β-: 100.00%	241U 16.8 M β-: 100.00%	242U 243U	

Besoin de stratégies « flexibles » :

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

Un parc français académique

➤ Simplifications et paramètres :

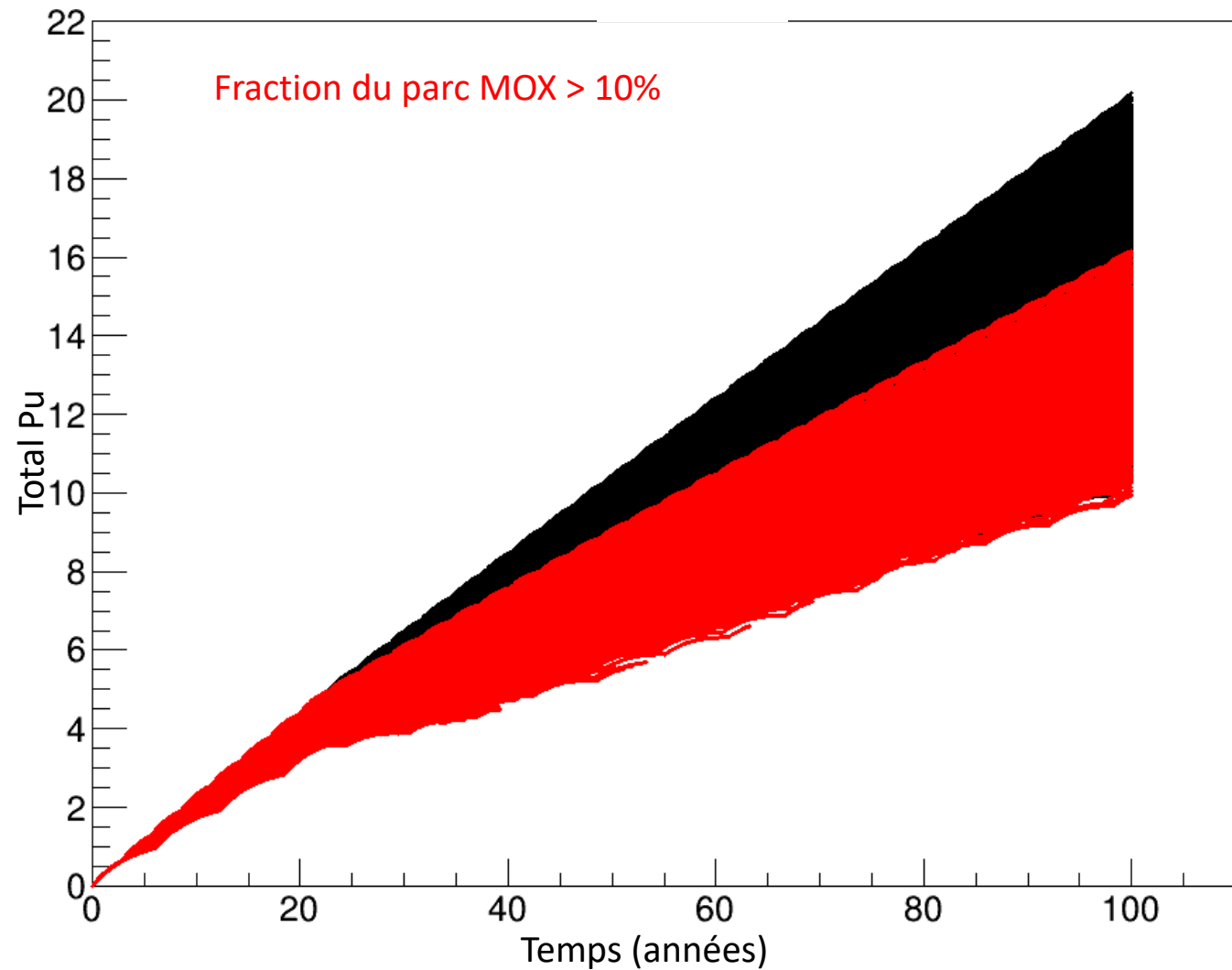
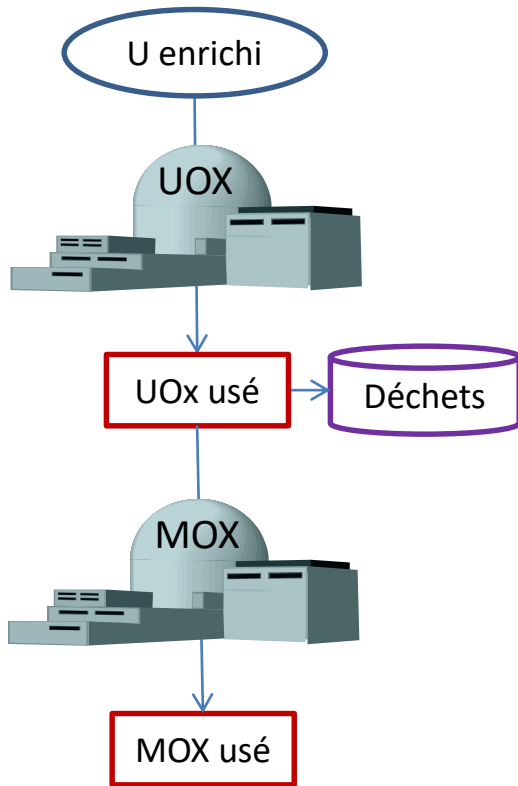


➤ Echantillonnage et réalisation de N calculs (N ~ 10 000)

➤ Observables

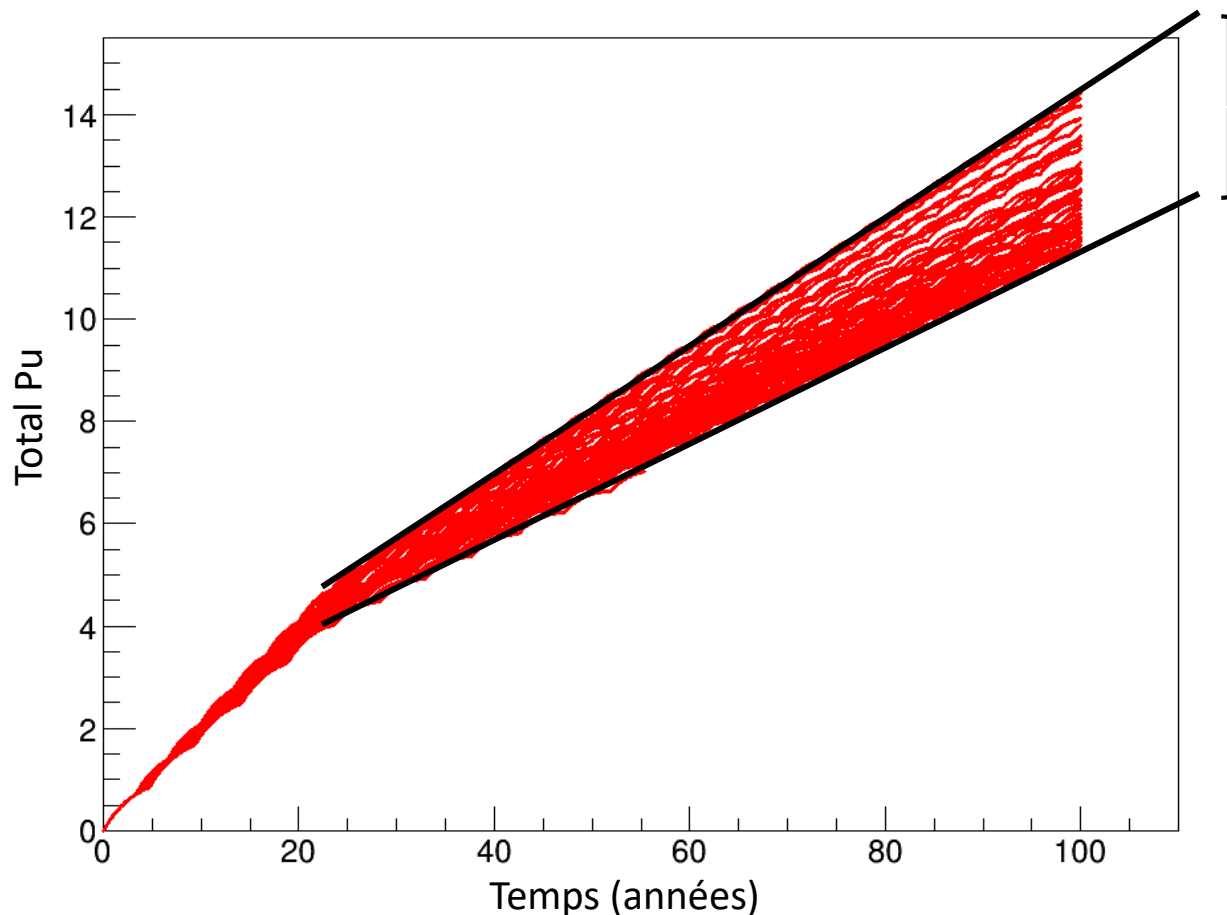
- Inventaire plutonium total en cycle
- Production d'actinides mineurs
- Consommation d'uranium naturel

- Ensemble des évolution du plutonium en fonction du temps



➤ 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)

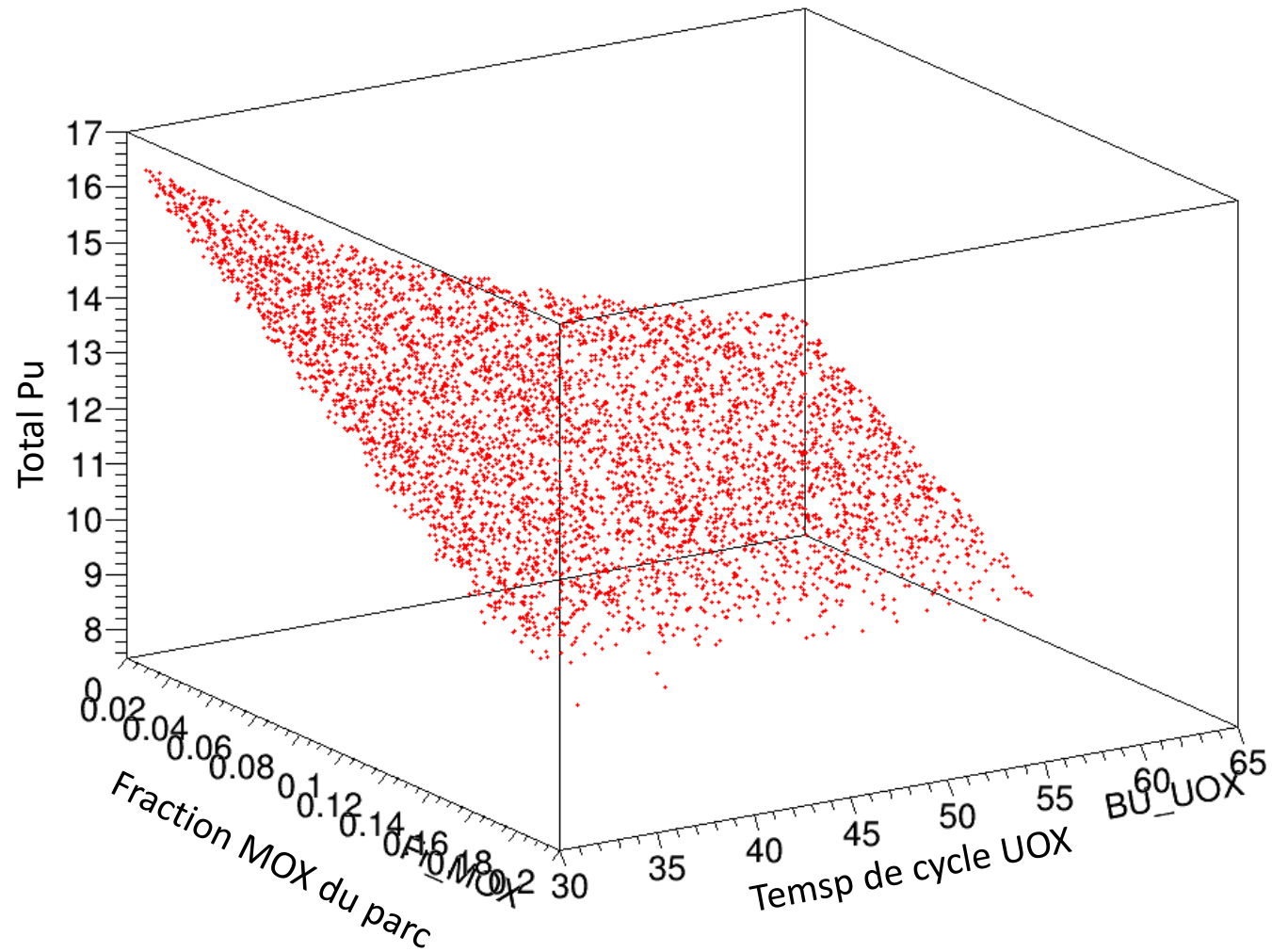
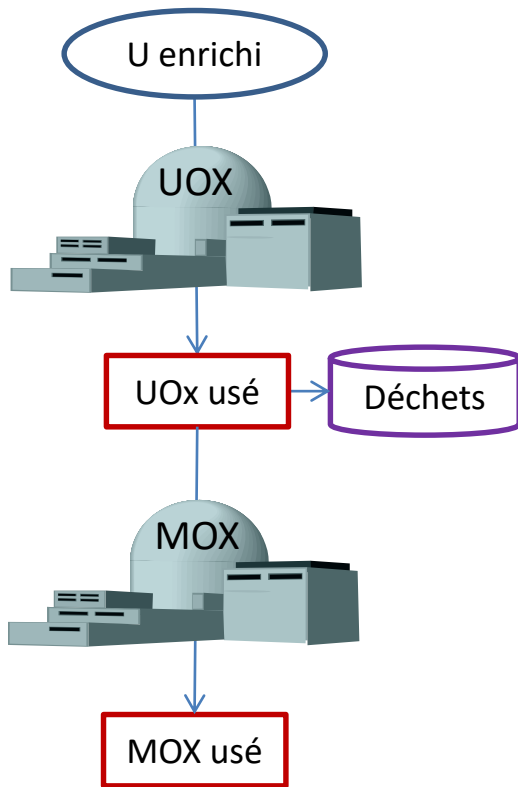


Variation de pente :
28 %

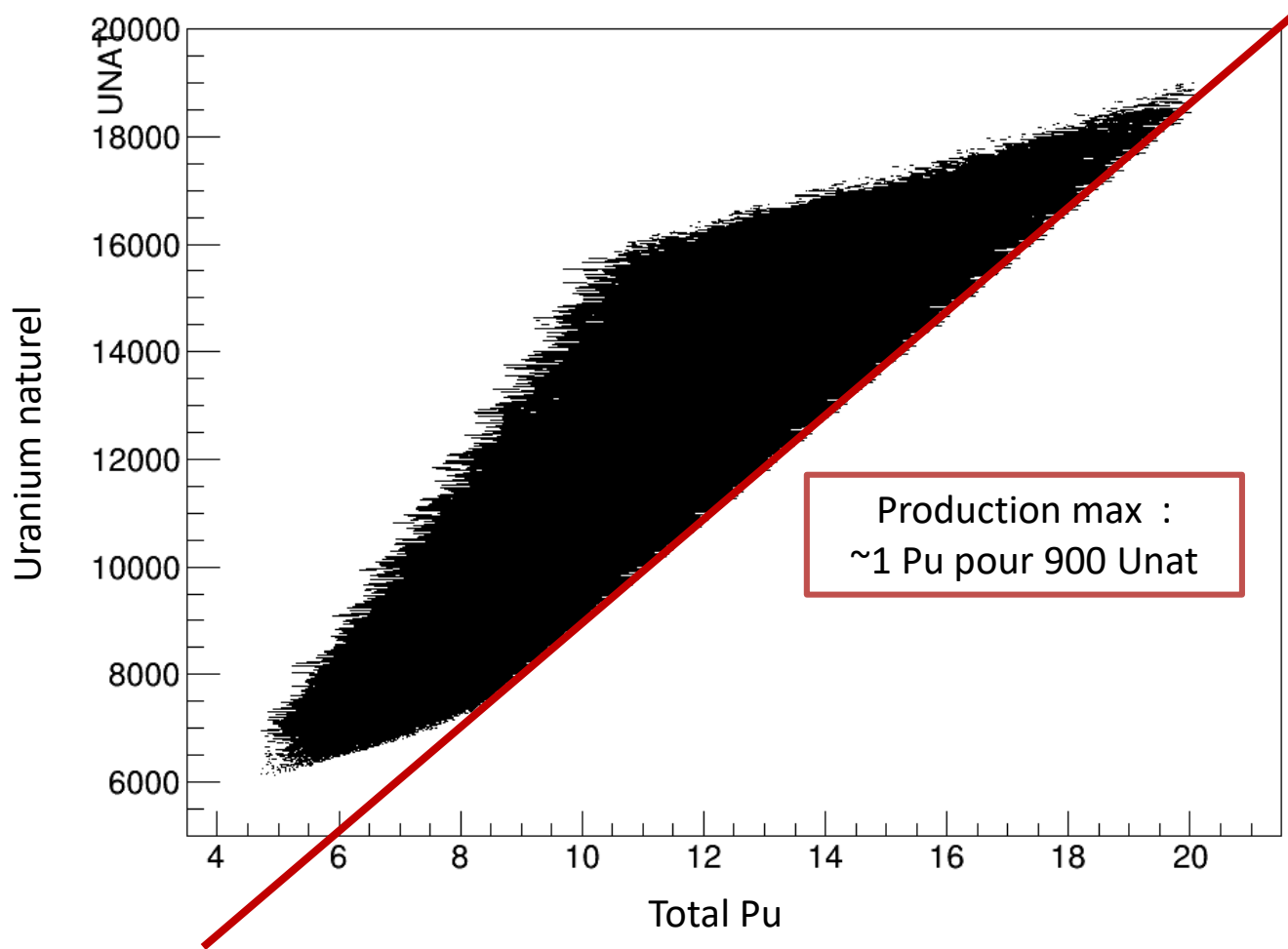
- Pour un parc 100% RNR il faut 1500 tonnes de plutonium
- Au rythme actuel de ~ 10 t/ans, un parc 100% RNR (à puissance constante) sera possible en 2150 !

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



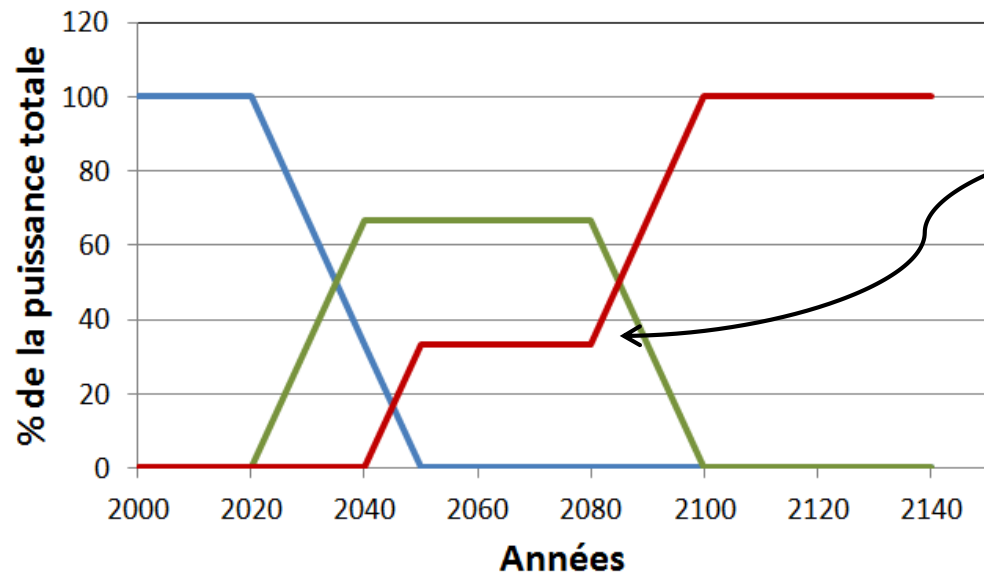
- Rappels :

- 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 !



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

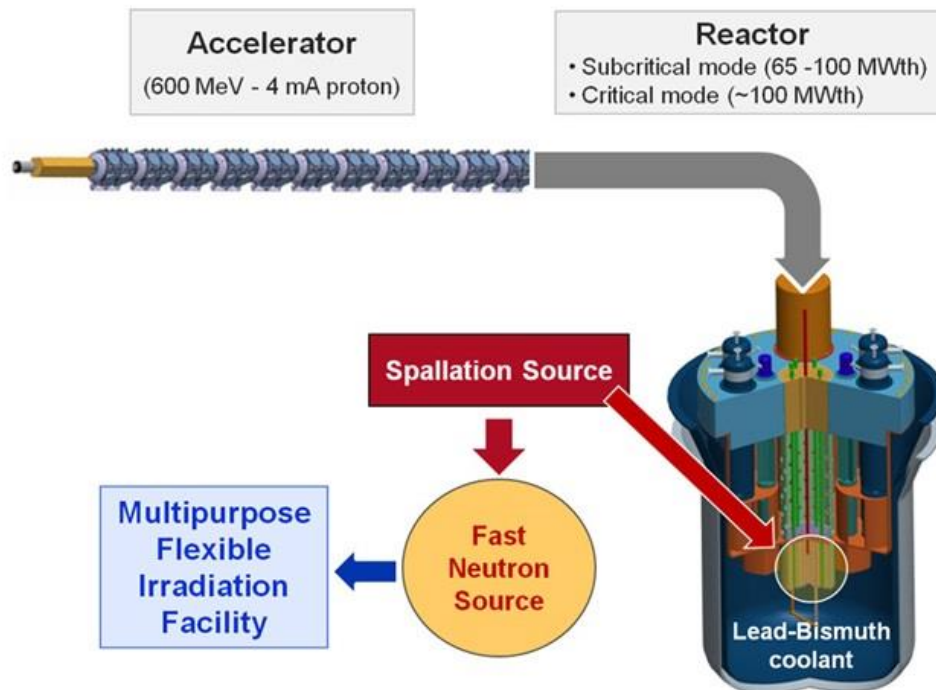
- La technologie actuelle consomme trop d'uranium naturel
- Il faudra entamer une transition GENIII-GENIV (qui nécessite une grande quantité de Pu)
- Plutonium est une matière valorisable

NON

Facteur 2

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

A l'échelle européenne : deux grands projets

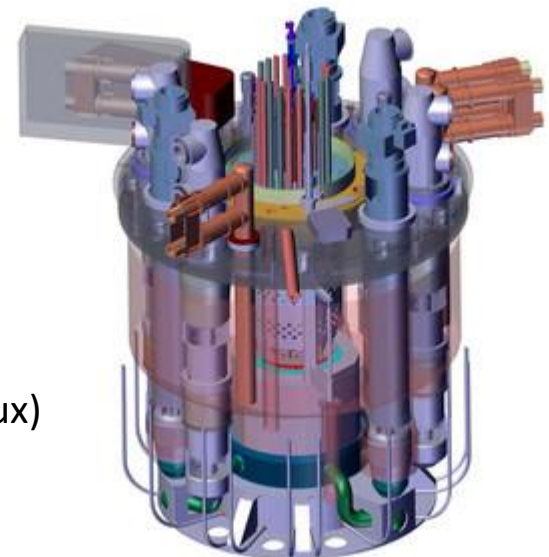


MYRRHA (SCK-CEN ; Belgique)

- 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



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/

Physique des 2 infinis =

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

