

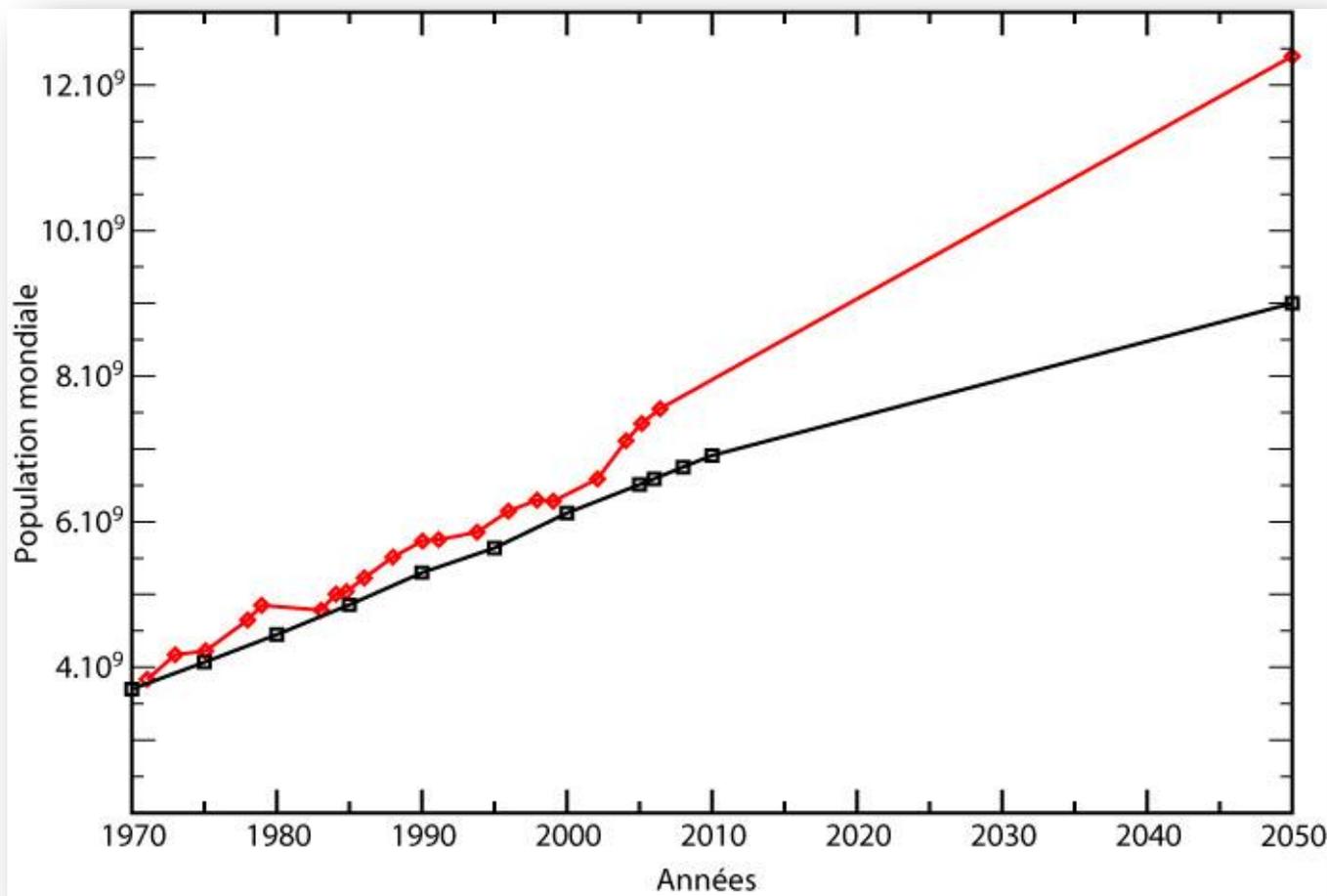
# Energie nucléaire du futur : Défis et enjeux de la recherche

De la physique au détecteur  
Bénodet, décembre 2014

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

# Débat énergétique : un problème très simple... Mais sans réponse !

Défi énergétique : augmentation de la population mondiale dans un contexte de changement climatique



Consommation électrique :  
- Monde → 250 W/hab  
- France → 1000 W/hab

En 2050 :

- Population totale : > 9 milliards d'habitants
- Consommation énergétique : ~20 Gtep

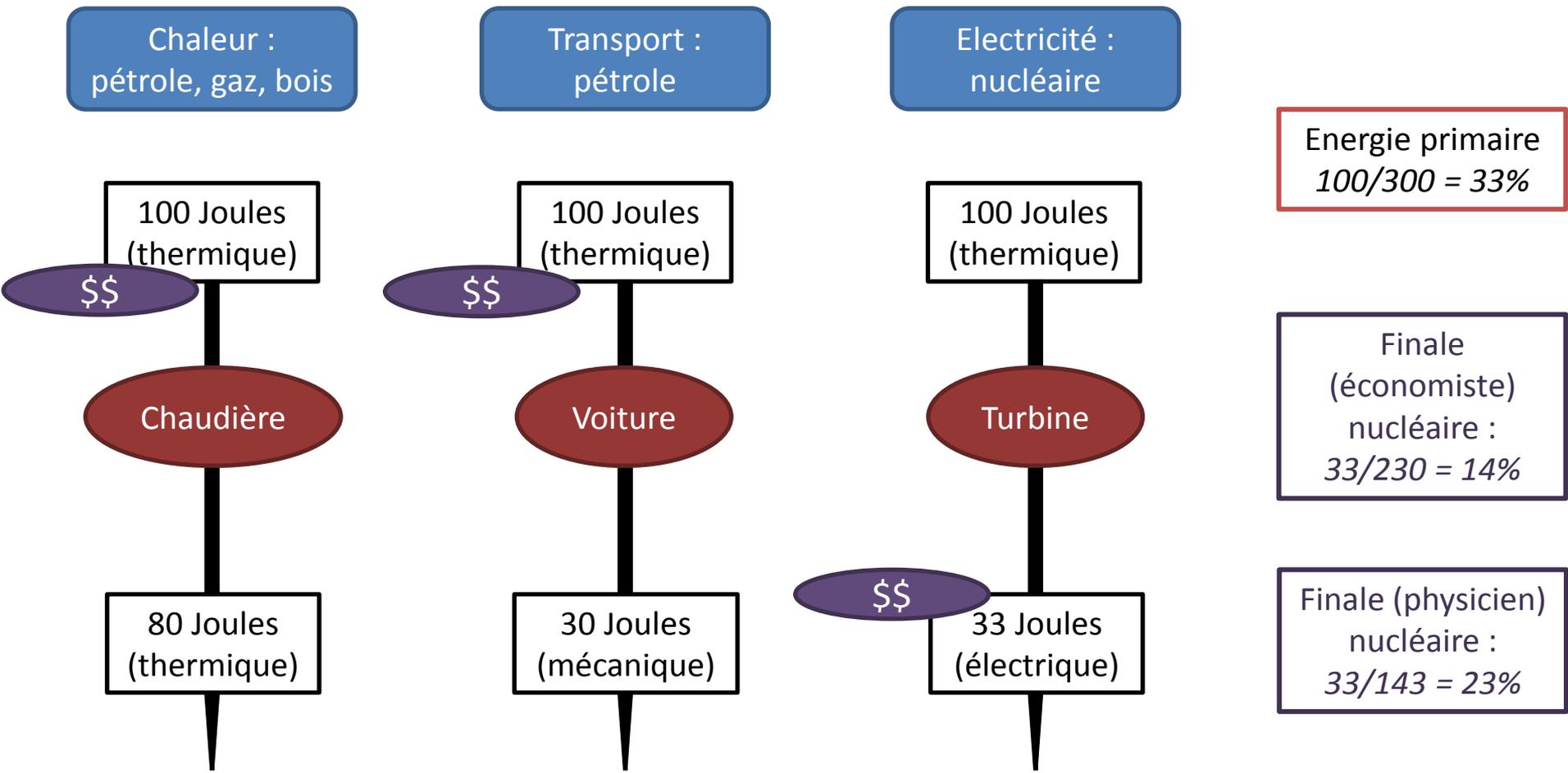


Contrainte économique  
Contrainte démographique  
Contrainte climatique

# Introduction : énergie primaire ou finale ?

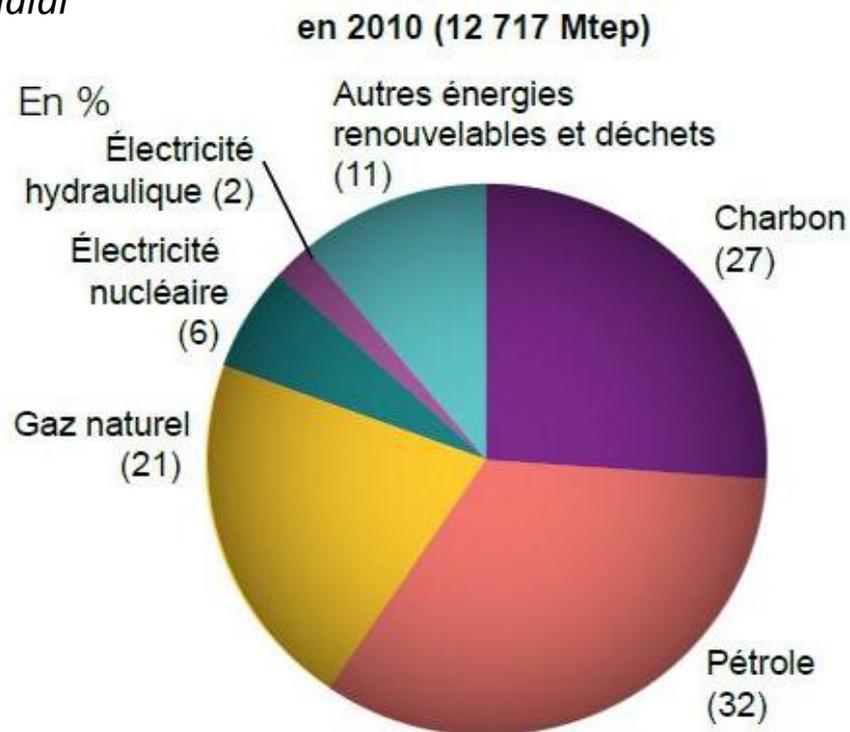
## Part de l'énergie nucléaire en France

- 17% selon Greenpeace (cf. leur site internet)
- 85% selon EDF (cf. votre facture)



La part du nucléaire en énergie primaire en France est de 39% !

## Mix énergétique primaire mondial

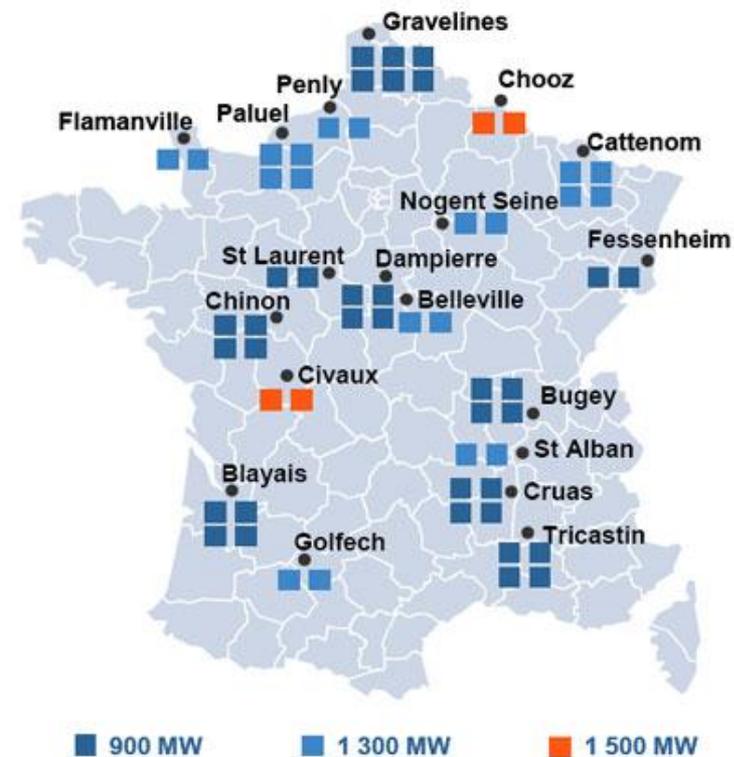


Source : Agence internationale de l'énergie, octobre 2012

## L'énergie nucléaire

- **6% mix énergétique primaire** (600 Mtep)
- 12% de l'électricité mondiale (en décroissance)
- 35% de l'électricité produite en Europe

# L'énergie nucléaire en France



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



Un réacteur pour 1,1 millions d'habitants

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

## Une question (au minimum) européenne :

les conséquences de l'arrêt du nucléaire anticipé en Allemagne suite à Fukushima

- Augmentation de l'importation du gaz venant de Russie
- Construction de réacteurs en Pologne
- Répercussions sur le coût de l'électricité

# La place du nucléaire dans les scénarios énergétiques

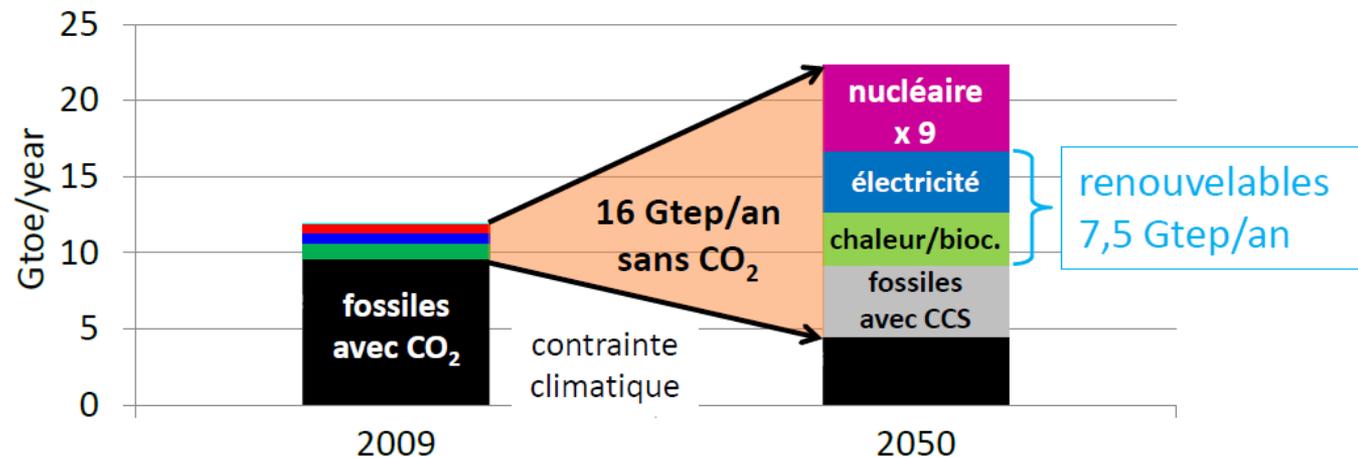
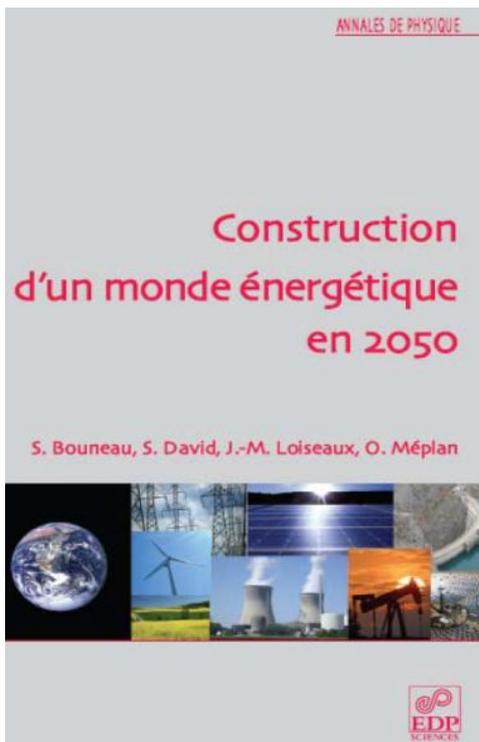
- Scénario NegaWatt : 0 TWh nucléaire produit en 2050
- Scénario pétrolier (Exon & Total) : production nucléaire reste stable en 2040
- Scénario 450 (AIE ; limitation de la température moyenne) : facteur 3 d'ici 2050

## Hypothèses : 3 contraintes

- Climat
- Production d'énergie
- Une répartition des consommations

## Variable d'ajustement :

- Part du nucléaire en 2050



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

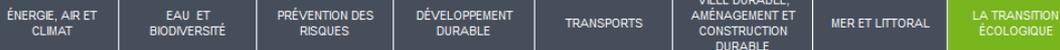
# Un débat auquel on n'y comprend rien



MINISTÈRE  
DE L'ÉCOLOGIE,  
DU DÉVELOPPEMENT  
DURABLE  
ET DE L'ÉNERGIE

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ÉNERGIE

Ministère | Conseil et expertise | Actualités | Salle de lecture | Services en ligne | Concours et formations | Politique de l'accessibilité | Consultations publiques



Accueil du site > Énergie, Air et Climat > La transition énergétique pour la croissance verte

ÉNERGIE, AIR ET CLIMAT



La transition énergétique pour la croissance verte

Actualités

Grands axes du projet de loi

Consultations pour l'élaboration de la loi

Création d'emplois

Financement de la transition énergétique

Conférence bancaire et financière

Les territoires en mouvement

Communication du 18 juin

LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE pour la  
CROISSANCE VERTE

Ségolène Royal a présenté en Conseil des ministres le 30 juillet, le projet de loi relatif à la transition énergétique pour la croissance verte. Un projet de loi majeur du quinquennat qui fixe des objectifs clairs et met en place des outils opérationnels ainsi que des aides simples et efficaces pour faire baisser la facture énergétique de la France et des Français, et lutter contre le réchauffement climatique.

Vous avez la parole

Participez à  
LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE pour la  
CROISSANCE VERTE  
www.votreenergiepourlafrance.fr

Donnez vos avis  
et vos idées.

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

... MAIS ??

→ *Ouverture de 2 EPR en UK*



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

- Définit le rôle des grands acteurs (ASN et IRSN, ANDRA, Organisme de recherches)
- Mobilise des organismes de recherches sur les questions d'intérêts nationales



L'IN2P3 est mobilisé depuis ~1995

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

## **1/Physique nucléaire et physique des réacteurs**

De la fission à la réaction en chaîne

Criticité et technologie de réacteurs

L'importance des données nucléaires

## **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 ?

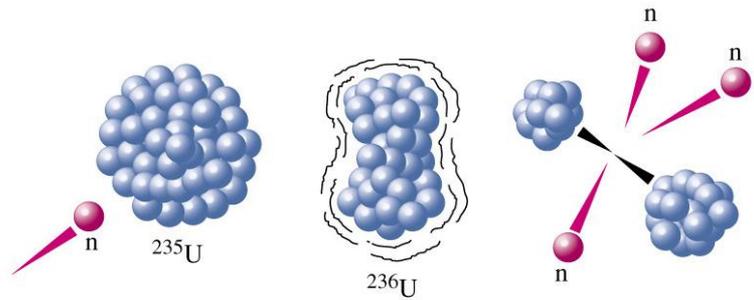
## **Conclusions**

Des ordres de grandeurs qui compliquent le débat

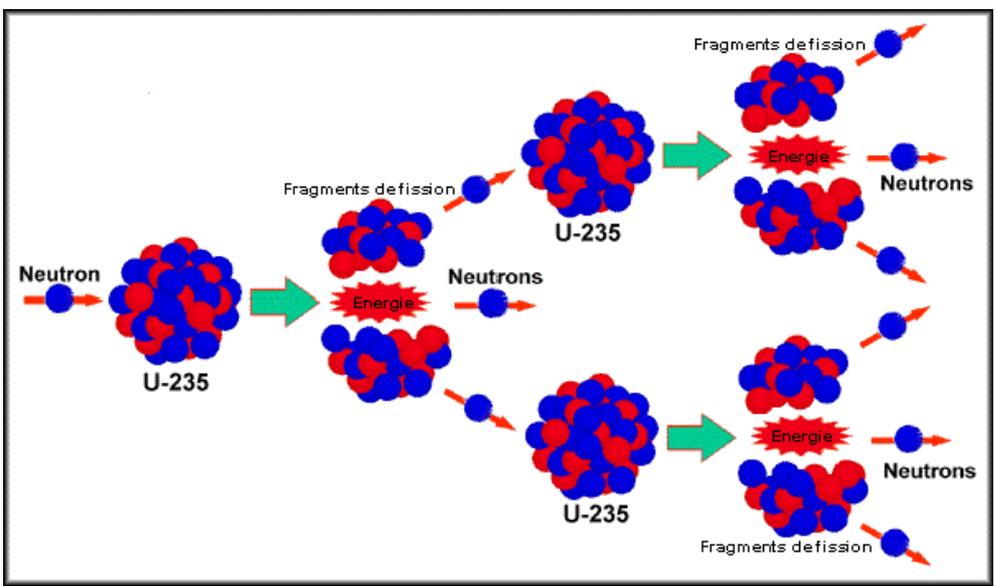
Les projets de réacteurs européens

La place du CNRS/IN2P3 dans le débat

# La fission



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



Avec les neutrons produits par la fission, on peut provoquer d'autres fissions et établir une réaction en chaîne

*On définit le Coefficient de multiplication de neutrons (k) comme le nombre de neutrons produits par fission par neutron présent*

Si on injecte 1 neutrons :  
1<sup>er</sup> génération →  $k$  neutrons  
2<sup>ème</sup> génération →  $k^2$  neutrons  
3<sup>ème</sup> génération →  $k^3$  neutrons  
...  
 $n^{\text{ème}}$  génération →  $k^n$  neutrons

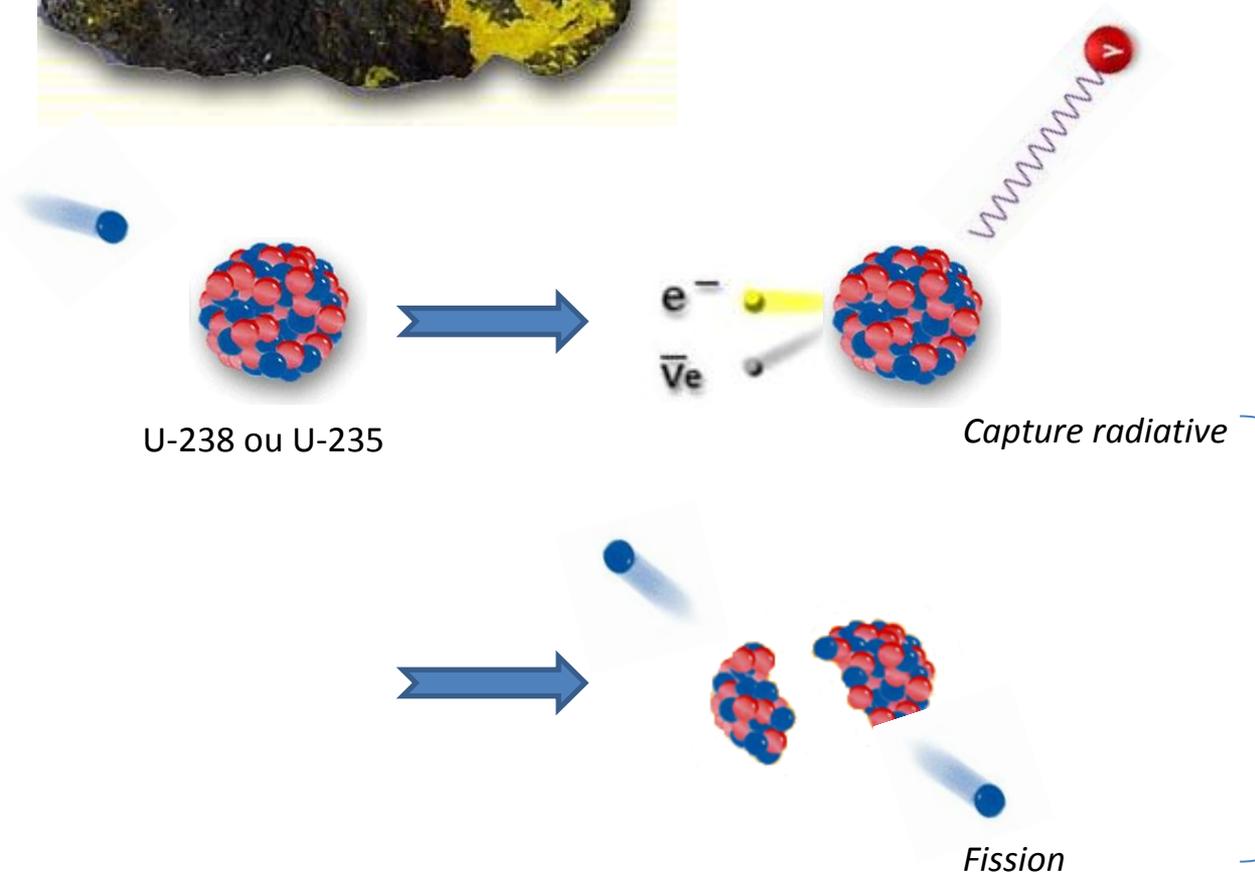
$k = 1$  → régime critique  
 $k < 1$  → régime sous-critique  
 $k > 1$  → régime sur-critique

# La fission



L'uranium naturel est composé de 0,7% d' $^{235}\text{U}$   
Le reste est de l'uranium 238

→ Est-ce que c'est critique ?



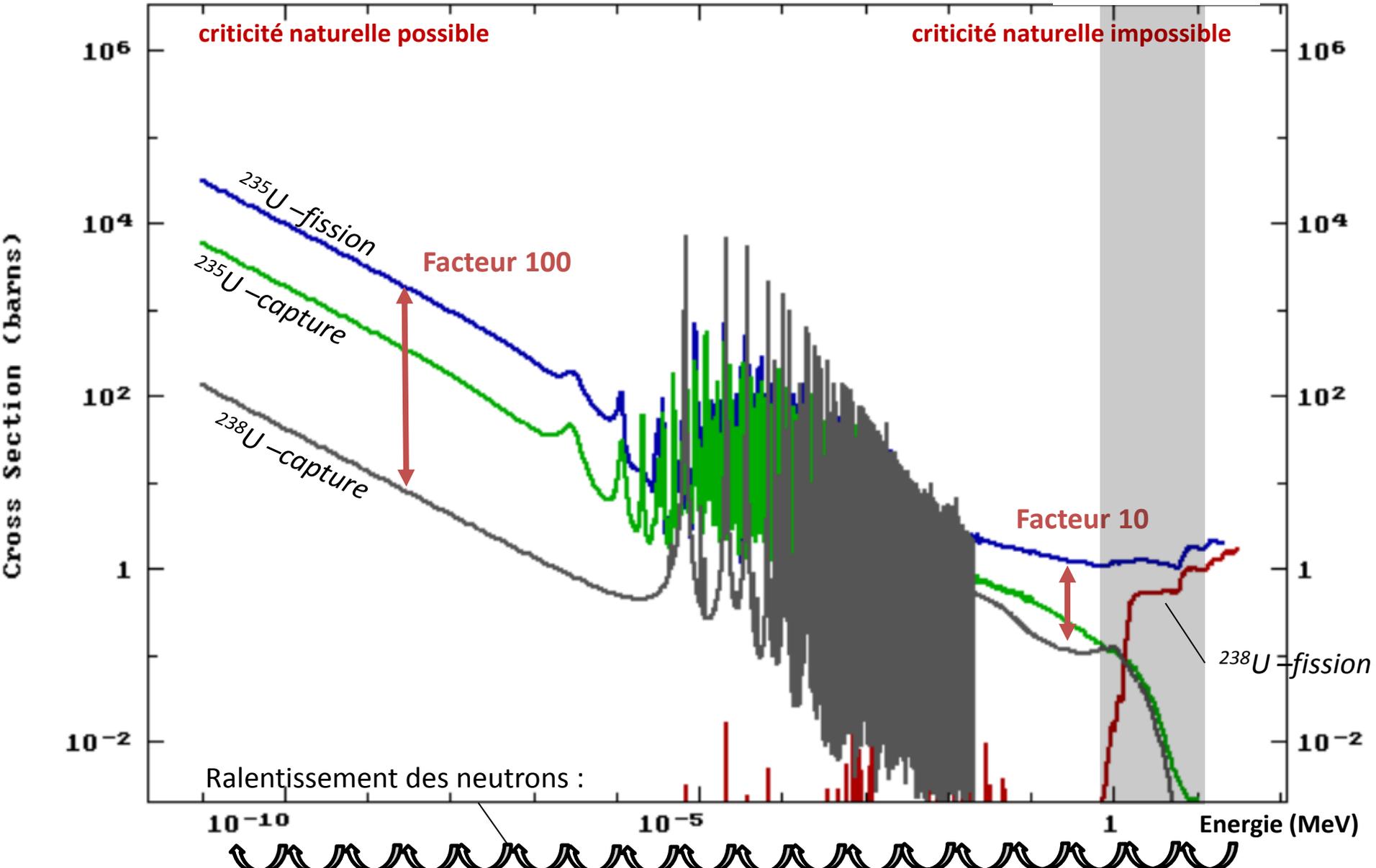
Les probabilités de réactions sont quantifiées par les sections efficaces de réaction neutronique...

... pondérées par la proportion relative de chaque noyau

# La criticité naturelle

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

Energie des neutrons émis par la fission



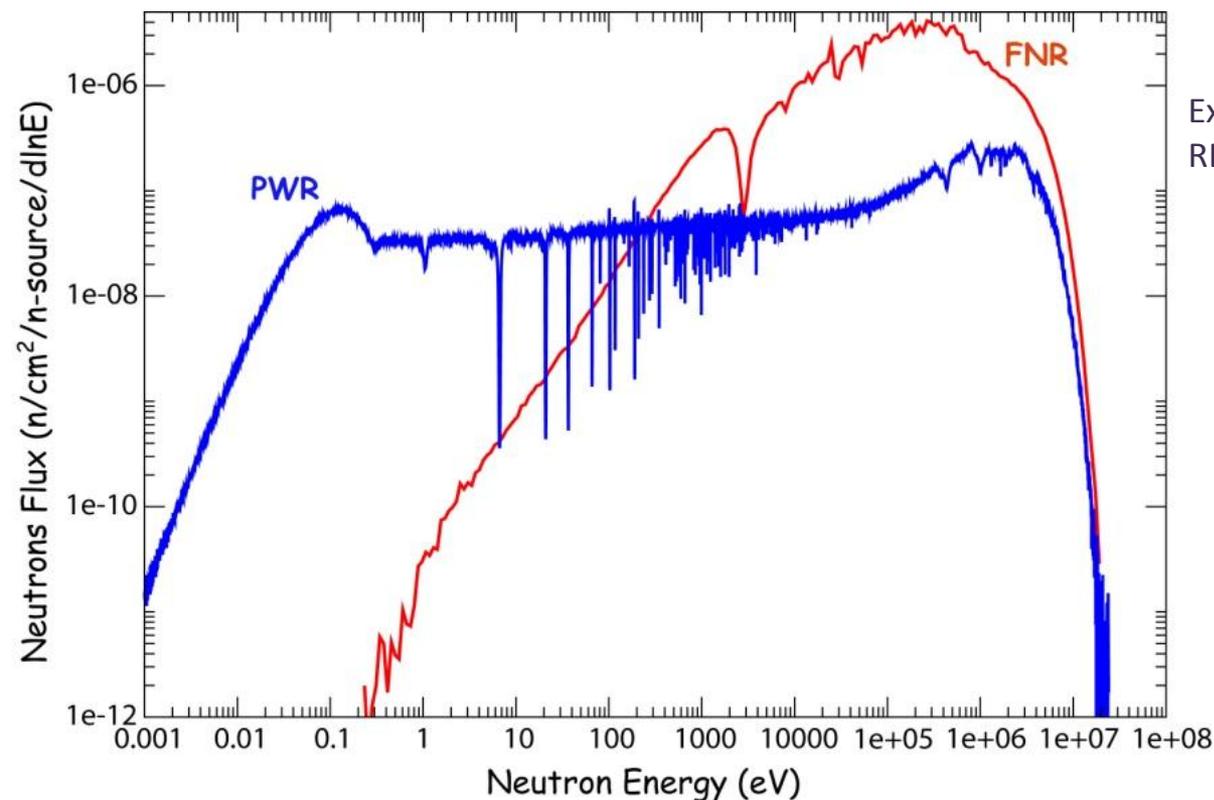


# La simulation des réacteurs

Dans un réacteur il faut :

- du **combustible** (pour les fissions et produire l'énergie)
- un **ralentisseur** de neutrons (pour avoir un ratio de sections efficaces favorables)
- un **caloporteur** (pour évacuer la chaleur et produire de l'électricité)

Chaque nouveau matériau interagit avec les neutrons et modifie donc l'énergie moyenne des neutrons



Exemple de spectre neutronique pour un REP et pour un SFR



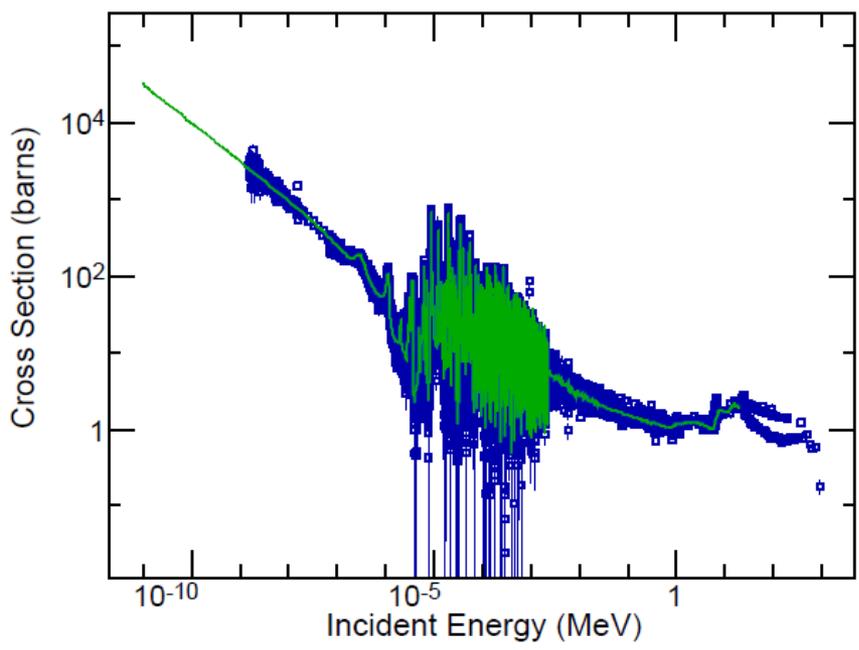
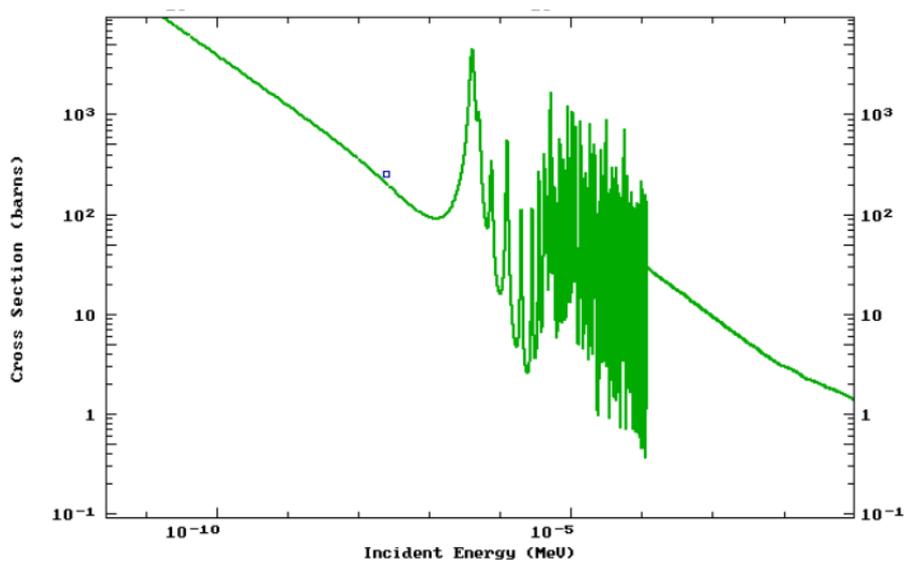
Simulation complexe pour

- Comportement accidentel
- Vieillesse des matériaux
- Production de déchets
- Consommation de combustible
- ...

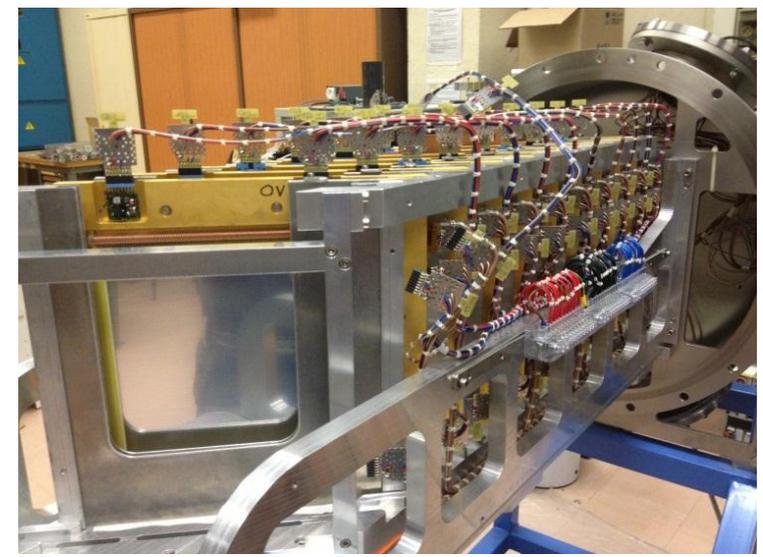
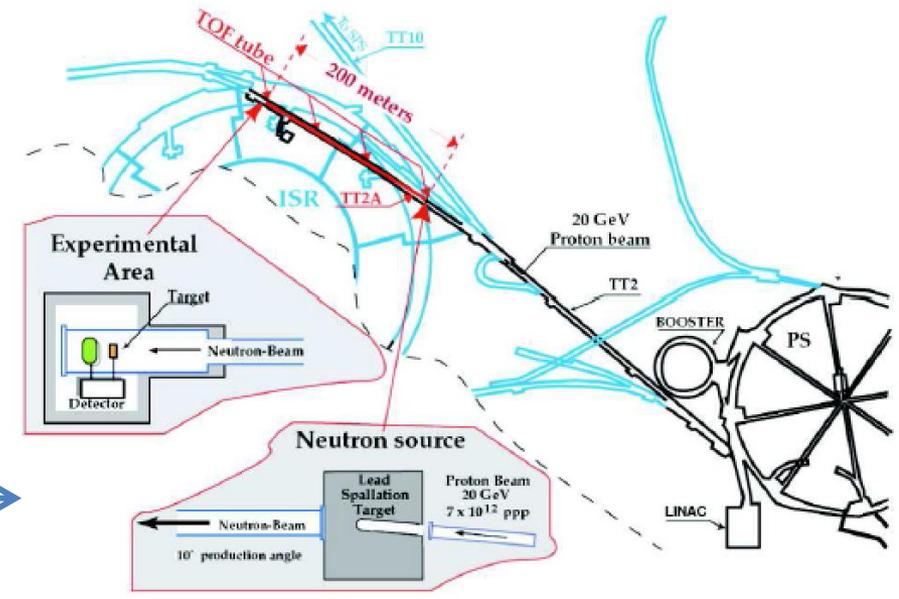
→ Chaque simulation est basée sur des données nucléaires qui donnent les sections efficaces (interaction neutrons/matières) pour chaque réaction et chaque noyau

# L'importance des données nucléaires

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



IN2P3 comme institut de physique nucléaire est naturellement placé pour réaliser des mesures de très haute précision

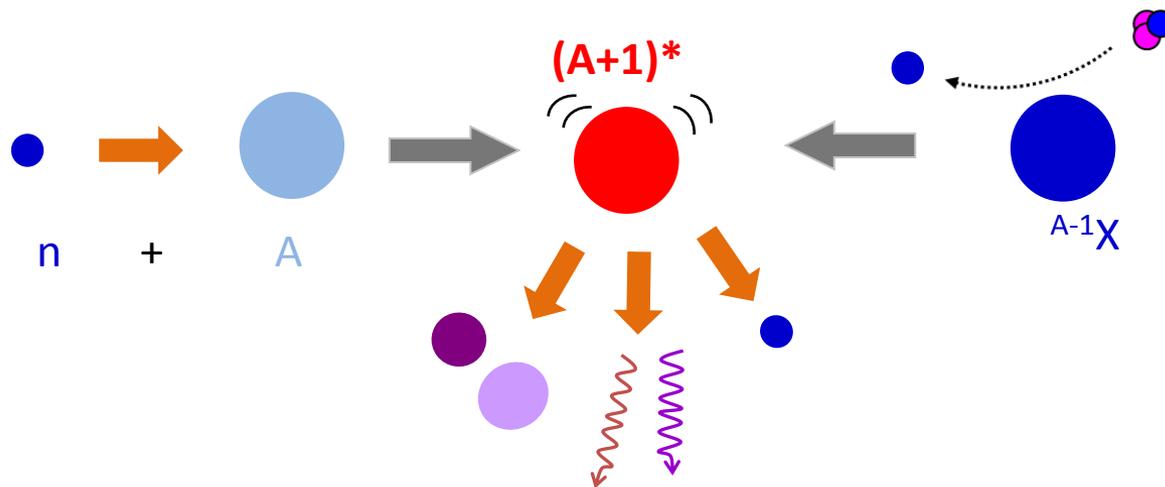




CACAO: Chimie des Actinides et Cibles radioActives à Orsay (inauguration 12 Juillet 2013)  
Laboratoire de fabrication et de caractérisation



$^{238}\text{U}$  337  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  ;  $\phi = 8$  cm  
Expérience de fission (n-TOF)  
→ support très fin Al de 0.75  $\mu\text{m}$



Besoin des modèles nucléaires  
pour valider la méthodologie

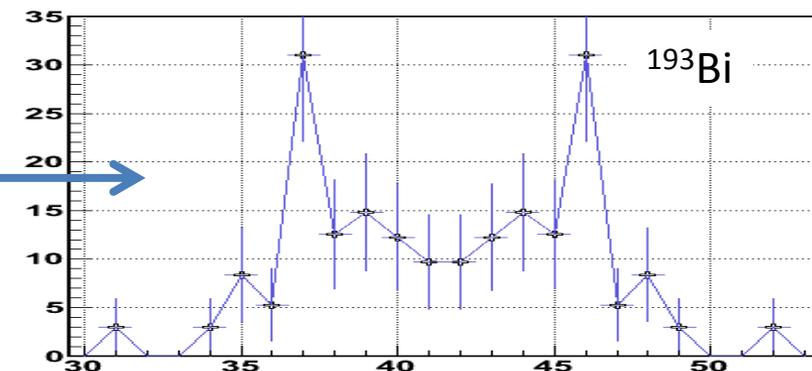
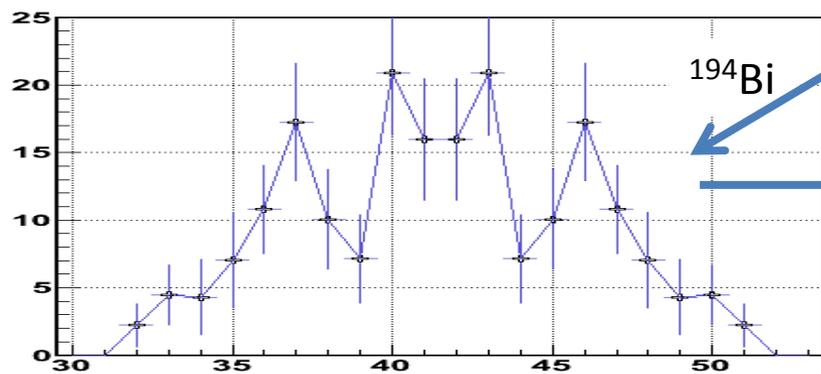
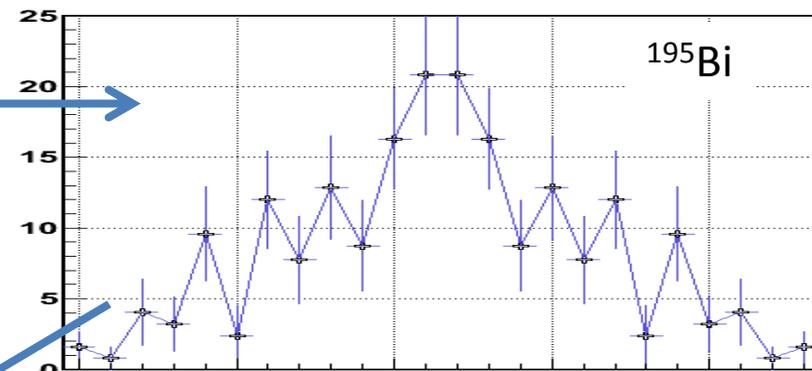
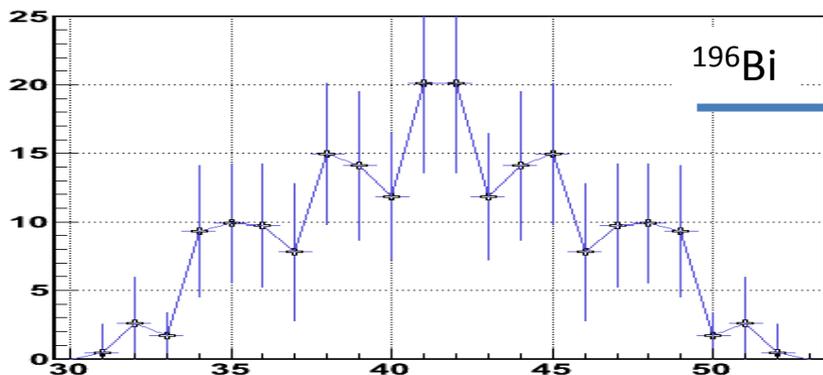
Et quand c'est vraiment trop radioactif, on utilise les réactions de transferts

# L'importance des mesures

L'études des données nucléaires sont à l'interface entre la physique fondamentale et l'application pour les réacteurs

→ Exemple : étude de la fission (exp. SOFIA à GSI)

– transition symétrie/asymétrie expliqué par les couches des fragments



Mesure différentielle

Un noyau,  
une réaction,  
une énergie

Données évaluées

Tous les noyaux,  
Toutes les réactions,  
Toutes les énergies

Codes neutroniques

Création de cible ;  
irradiation via accélérateur

Modèles nucléaires

## Ce qu'il faut retenir

- **L'uranium 235** permet l'établissement d'une **réaction en chaîne contrôlée et stable**
  - Les réacteurs sont le résultat d'un compromis entre l'enrichissement et la technologie
- **La physique des réacteurs** se base sur une connaissance **fondamentale du noyau**
- L'étude **statistique des neutrons** dans les réacteurs nous permet d'en déduire ses **propriétés**
  - Consommation de combustible
  - Production de déchets
  - Sûreté
  - ...

## 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

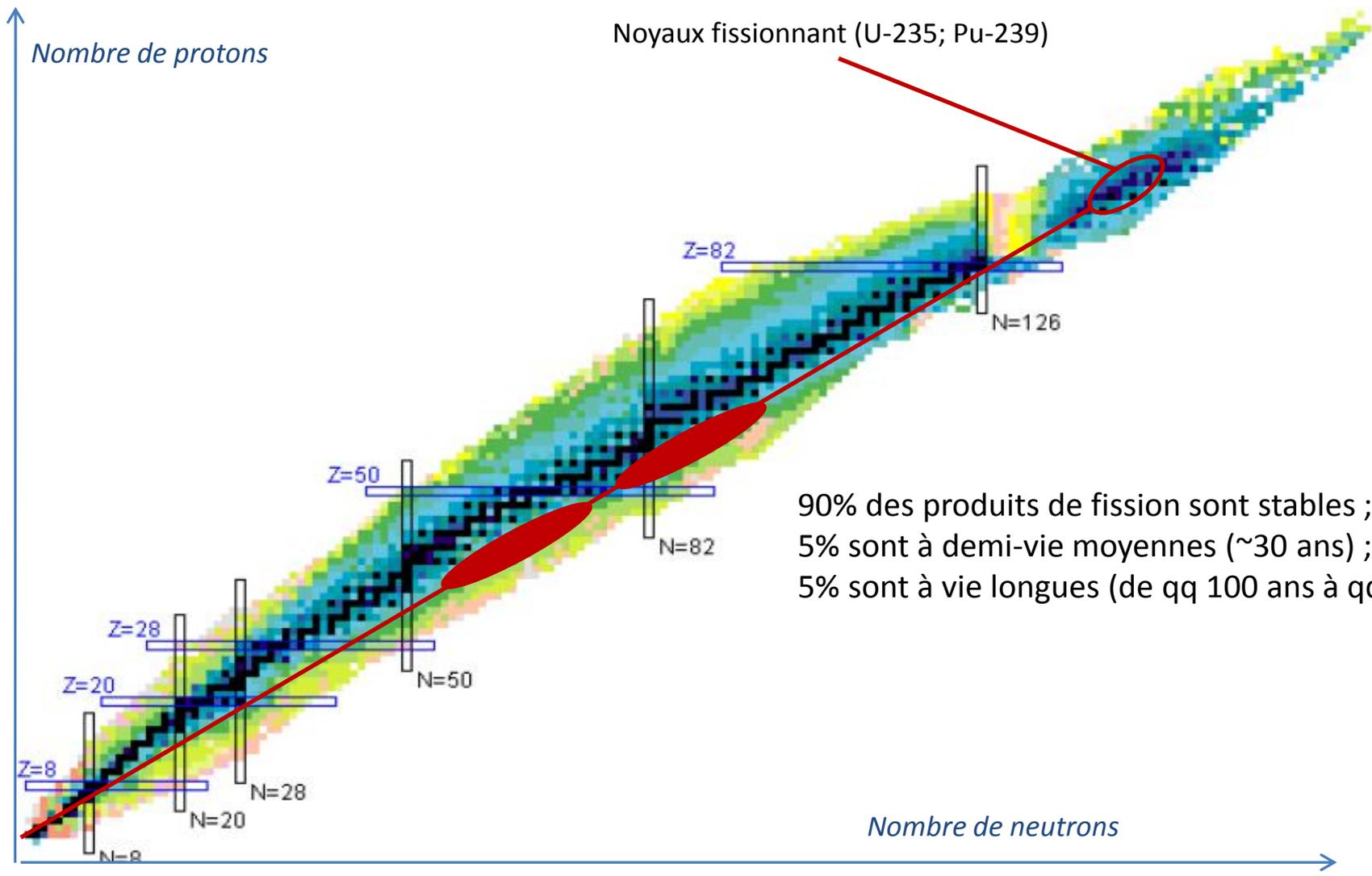
L'intérêt de la stratégie française

### 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 10<sup>6</sup> ans)

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

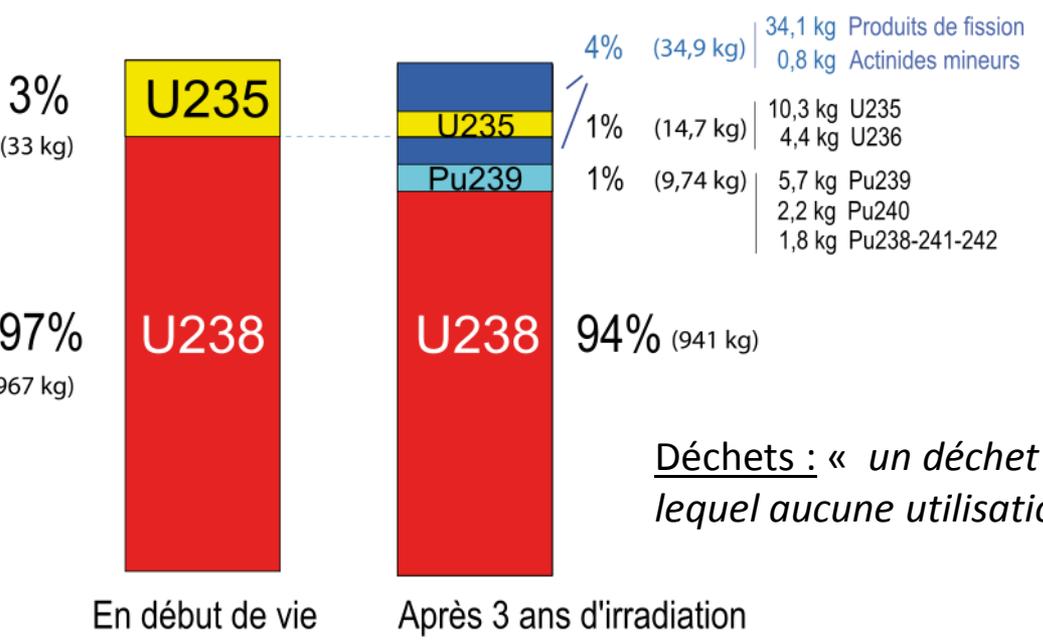
*Une semaine après l'arrêt le dégagement de chaleur correspond à 9000 radiateurs dans un studio parisien*



L'irradiation produit des noyaux lourds par captures neutroniques :

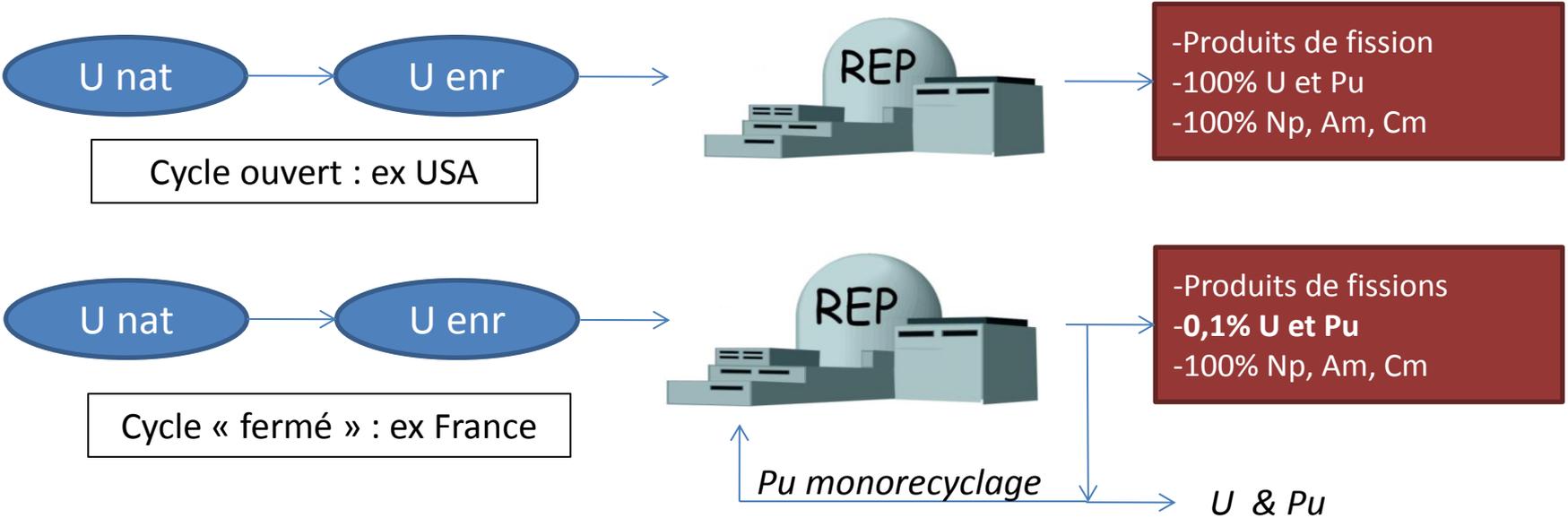
- Le plutonium est produit par capture sur l' $^{238}\text{U}$
- Les autres éléments sont les actinides mineurs !

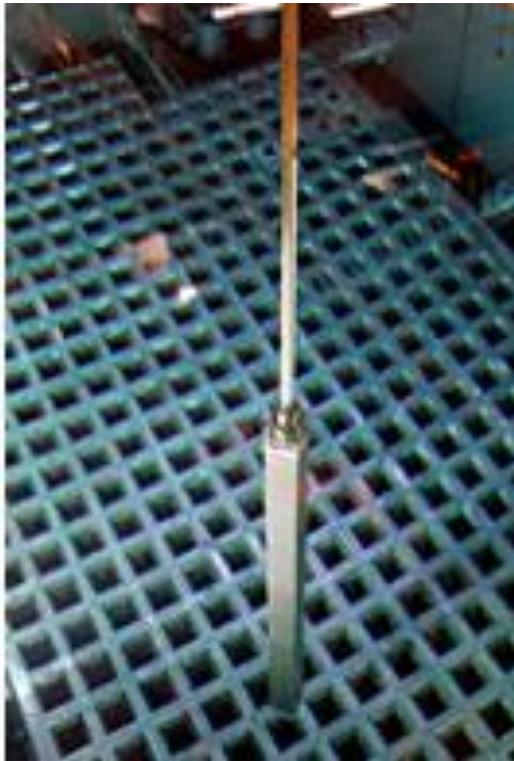
# Déchet nucléaire



« 96 % des combustibles usés sont ré-utilisable »

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



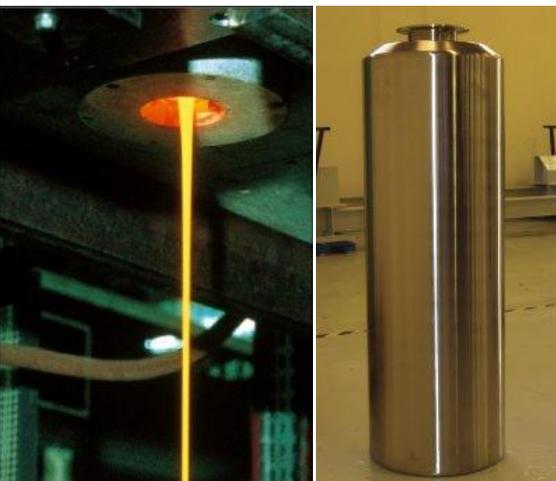
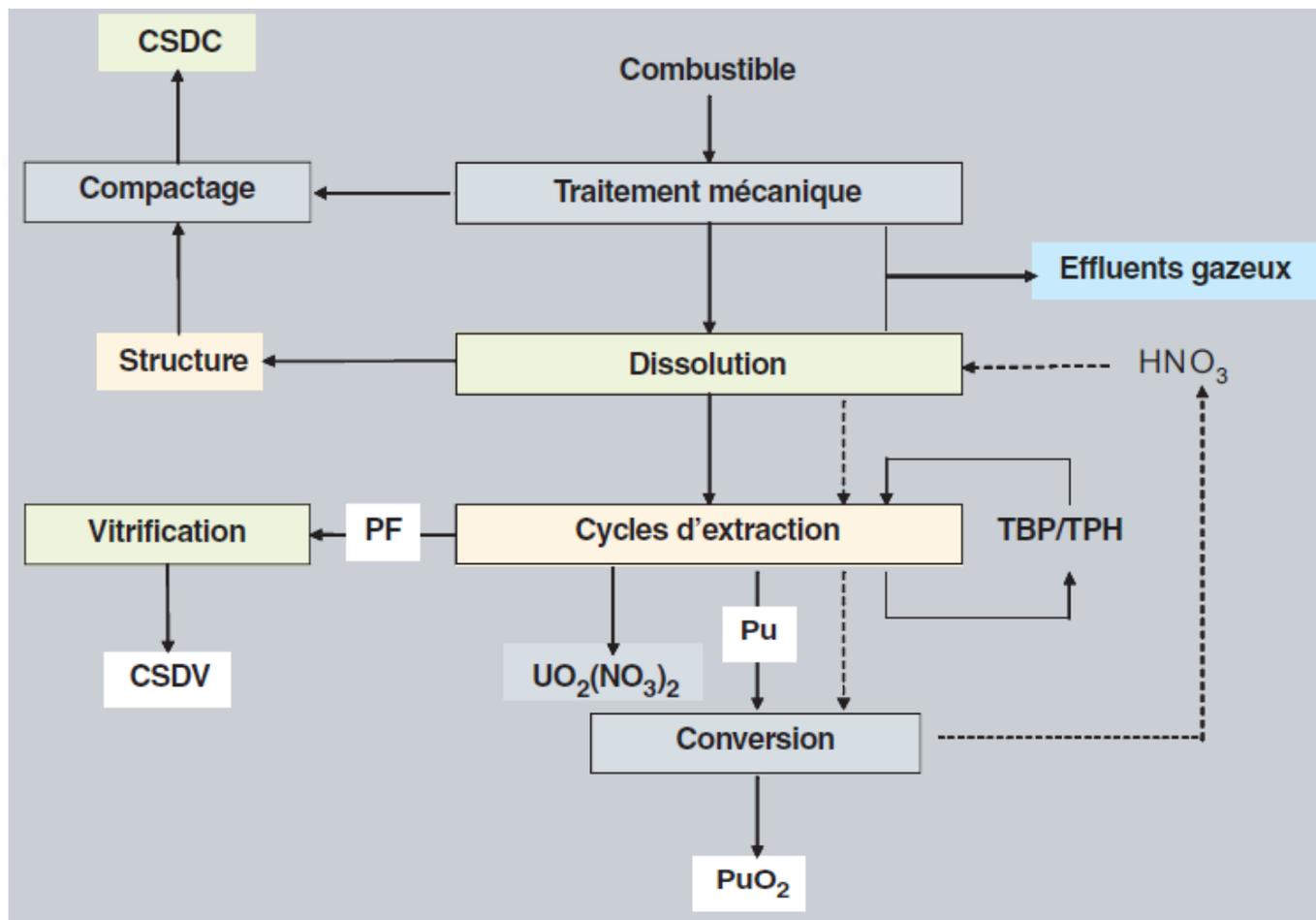


On laisse refroidir le combustible pendant 5 ans dans des piscines dans le bâtiment combustible

Puis on transporte les assemblages à sec dans des châteaux de transport



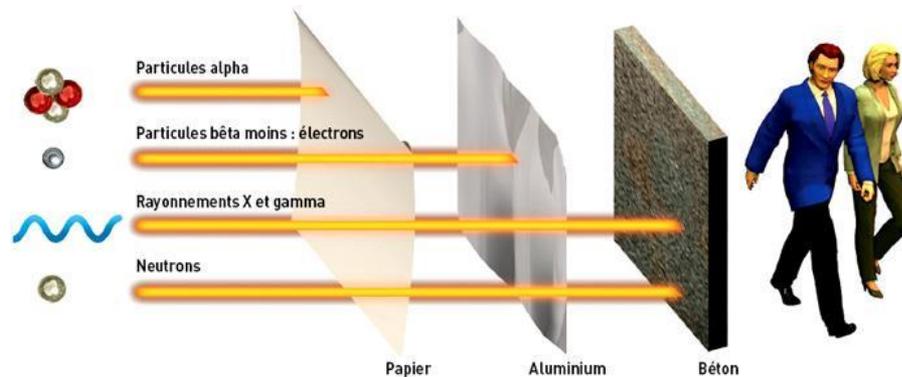
# Le procédé de retraitement



L'amélioration du procédé de retraitement (extraction des actinides, séparation poussée) est un axe de recherche portée par l'IN2P3

# 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 radioactivité c'est dangereux !

Effet directs à haute dose :

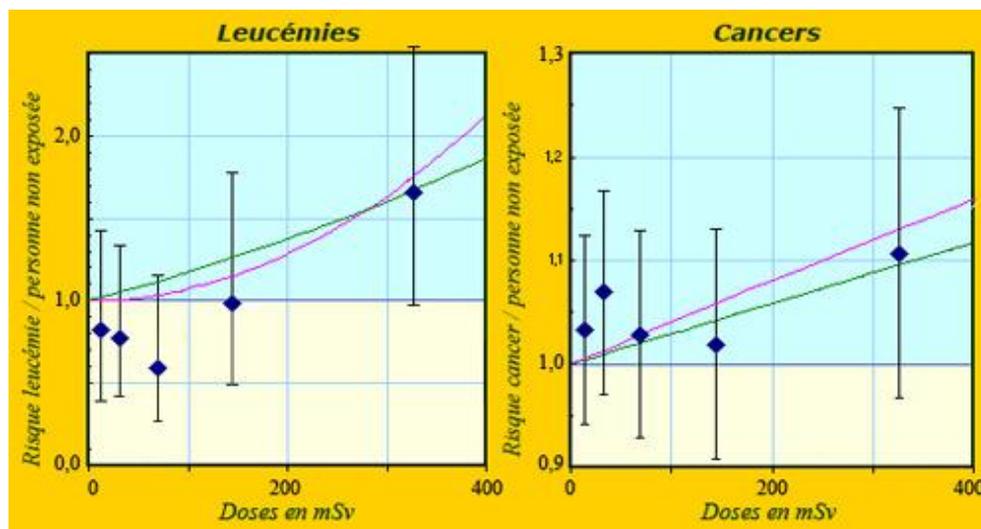
- 40 Sv : Destruction des cellules nerveuses : coma et mort
- 20 Sv : Seuil des brûlures
- 10 Sv : Nausée, vomissement : hémorragie digestive létal

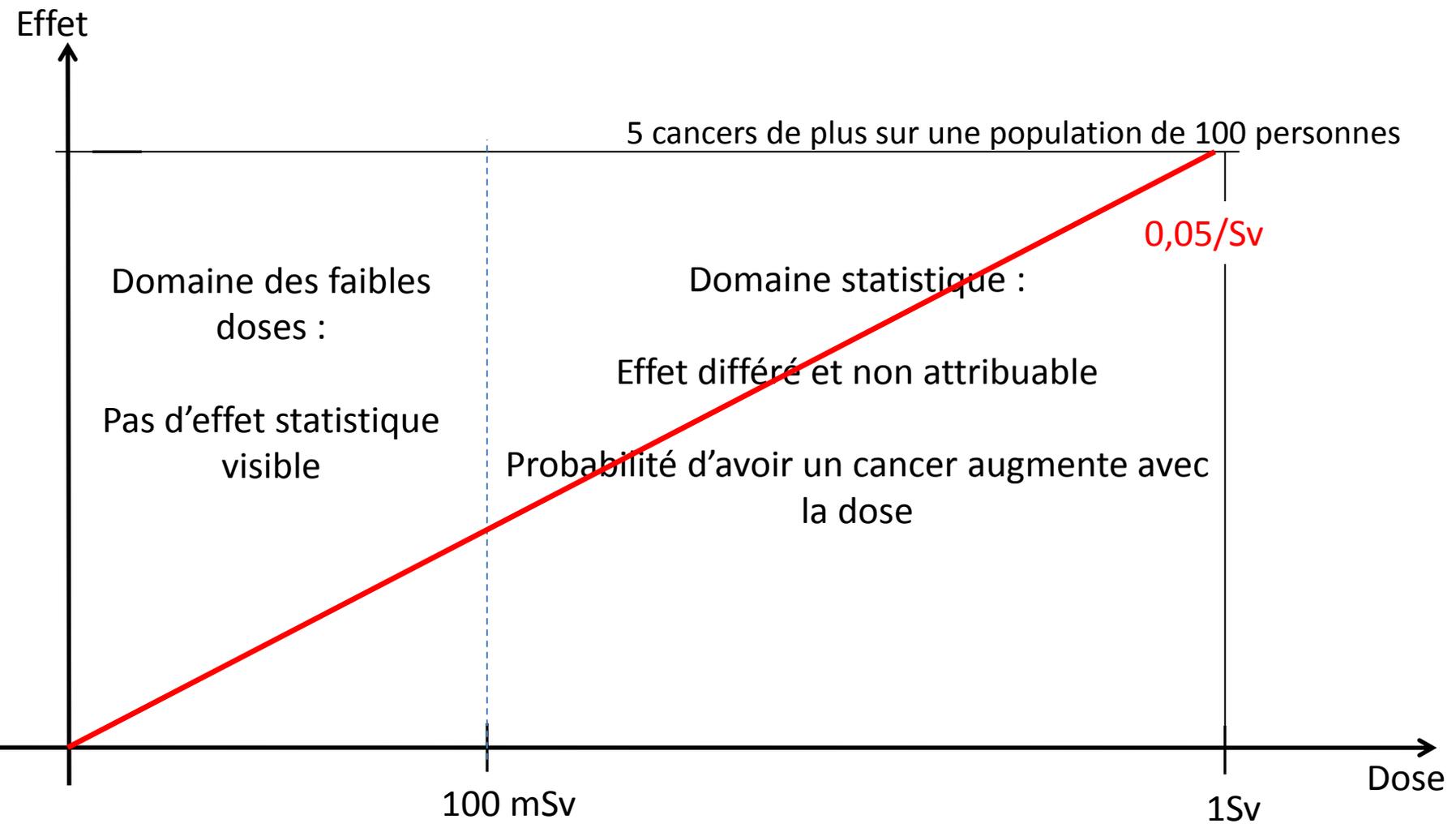
Tchernobyl : > 47 morts directs en 1 mois suite à l'irradiation

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

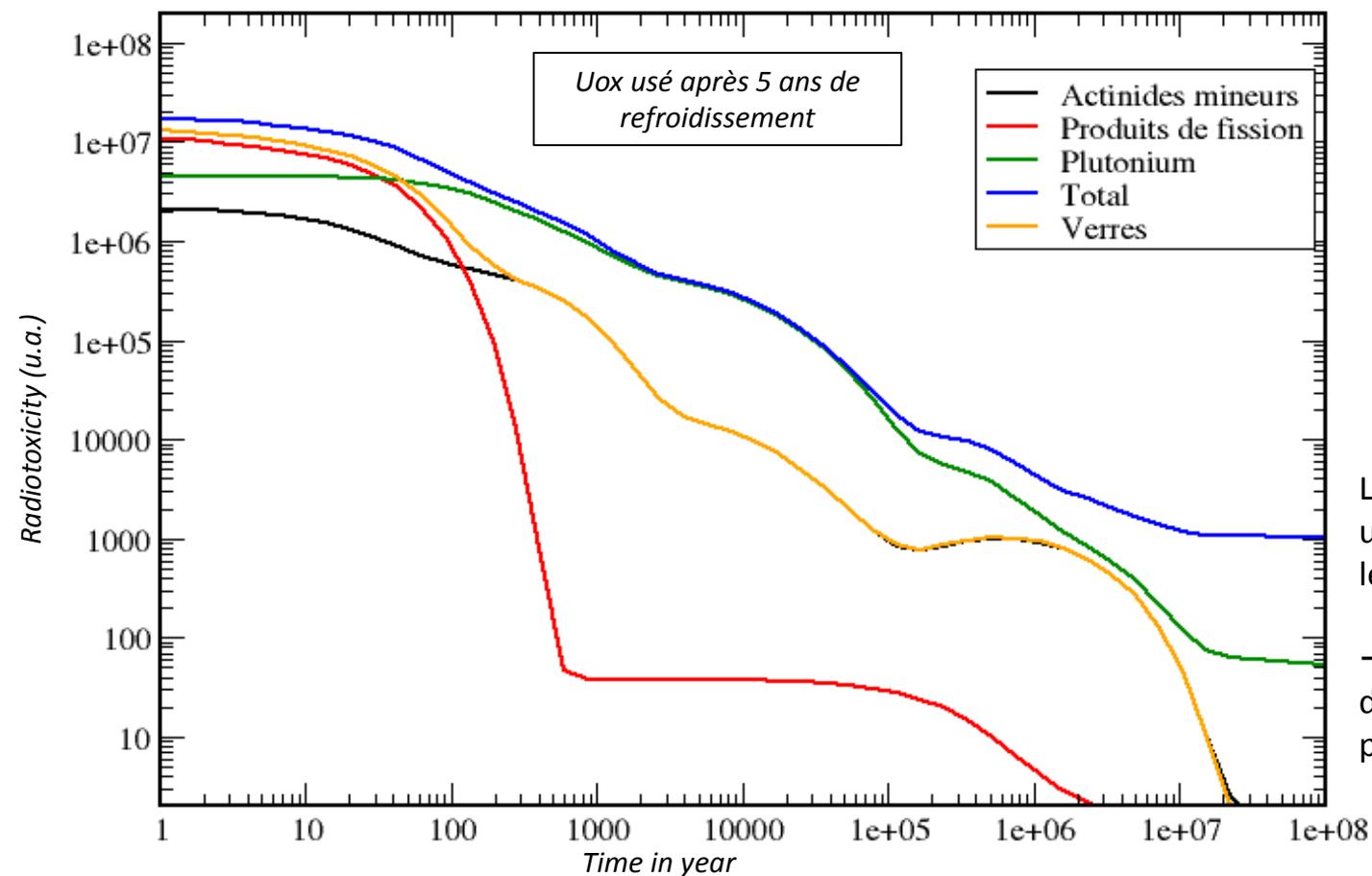
# Comment qualifier les déchets nucléaires ?

## 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

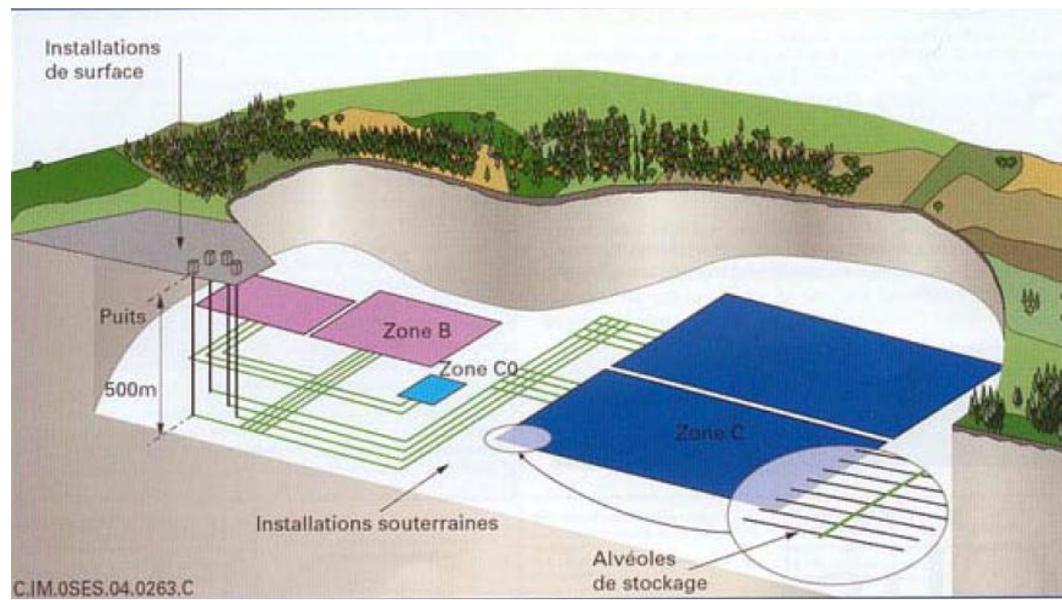
→ la radiotoxicité ne présente rien de réel mais est un bon moyen pour comparer les déchets



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

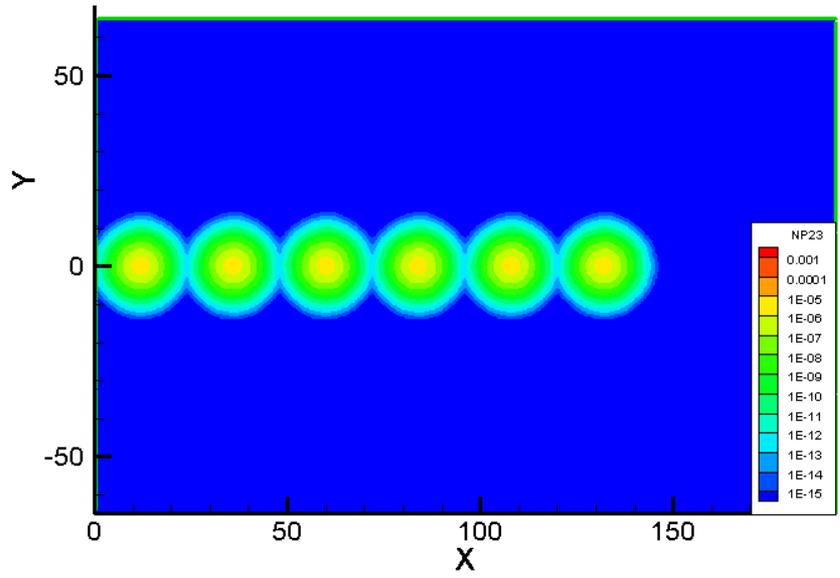
# Le stockage en couche géologique profonde



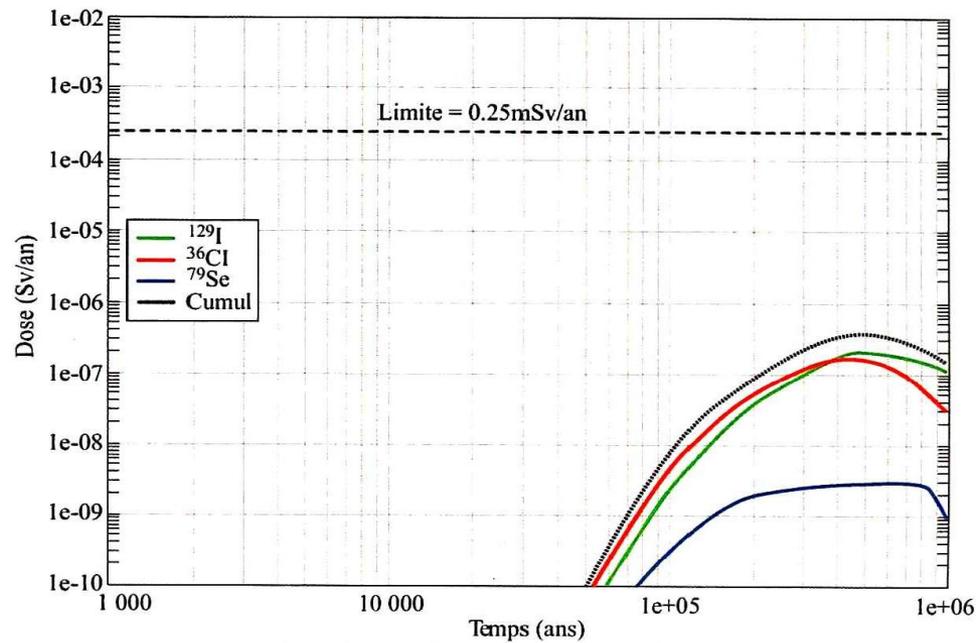
Deux types de déchets à vie longue  
 - Haute activité  
 - Moyenne activité



Est-ce sur ?



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



Dose maximale à la surface du au stockage

## 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<sup>er</sup> MAI AU 1<sup>er</sup> OCTOBRE 2013



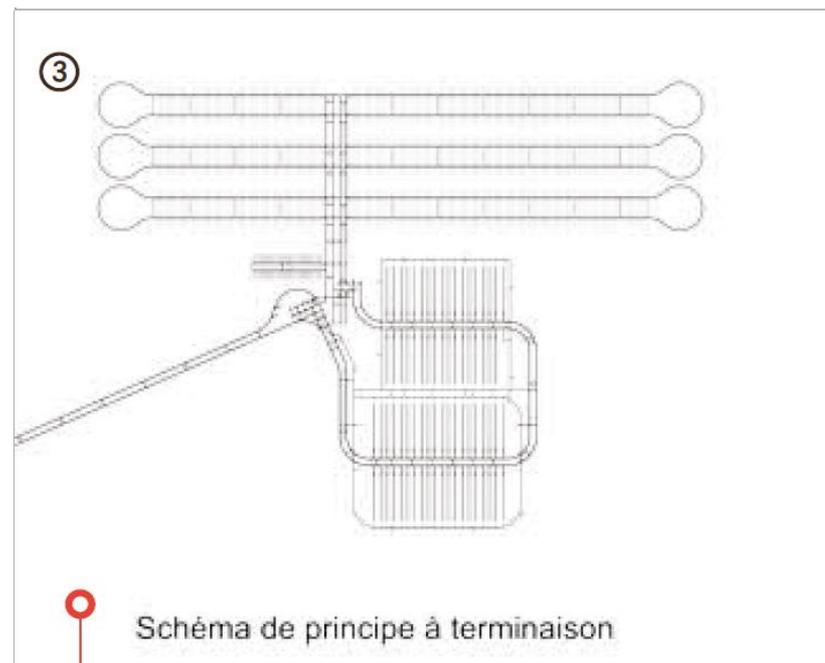
### L'inventaire de CIGEO :

	Déjà engagé*	Après 40 ans avec retraitement	Après 40 ans sans retraitement	Capacité CIGEO
HA-VL	5 700 m <sup>3</sup>	8 000 m <sup>3</sup>	93 500 m <sup>3</sup>	<b>10 000 m<sup>3</sup></b>
MA-VL	57 500 m <sup>3</sup>	67 500 m <sup>3</sup>	59 000 m <sup>3</sup>	<b>70 000 m<sup>3</sup></b>

\*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 km<sup>2</sup> à terme

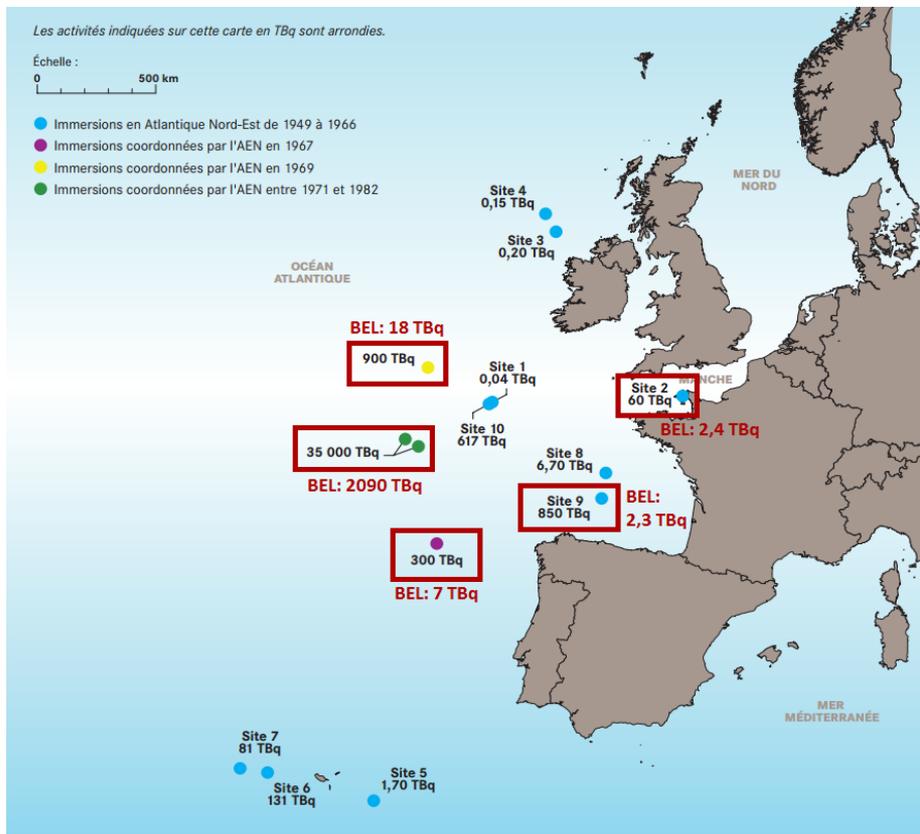


- 5% du total des déchets HA seront installés en 2025 dans CIGEO pour observation pendant 50 ans.
- Le stockage des HA ne débutera donc pas avant 2075 !

# La question des déchets n'est pas une problématique

→ 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  $\alpha$

Cas de la suède : les assemblages usés sont stockés en l'état

- 40 ans de refroidissement en piscine
- Stockage grantique à Forsmark (500 m)



Cas US de Yucca Mountain :

- Roche volcanique « très vieille »
- En 2009 Obama abandonne le projet parce que la rétention des radioisotope (surtout le Pu) n'est pas satisfaisante

# Quel gain aux combustibles Mox ?

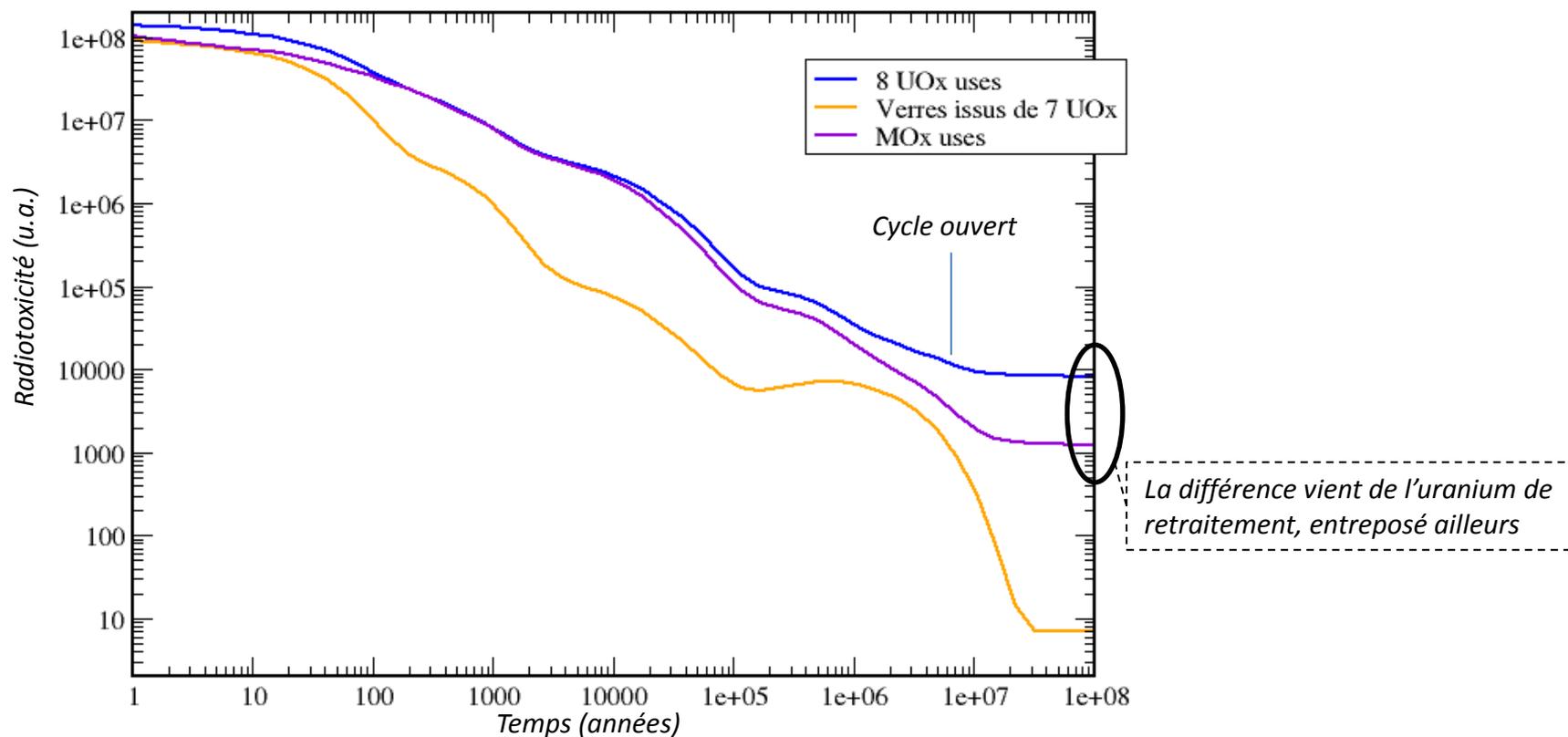
Le plutonium peut être utilisé comme matière fissile pour remplacer l'uranium 235.

→ 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**
  - **Du à la présence du Pu**
  - **C'est pourtant le Pu qui concentre la quasi-totalité de la problématique**
- L'étude **statistique des neutrons** dans les réacteurs nous permet d'en déduire ses **propriétés**
  - Consommation de combustible
  - Production de déchets
  - Sûreté
  - ...

... Le reste vendredi ...

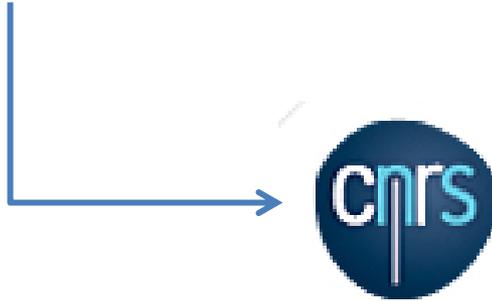
# Energie nucléaire du futur : Défis et enjeux de la recherche

2/2

De la physique au détecteur  
Bénodet, décembre 2014

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

Moratoire national sur  
les déchets nucléaires



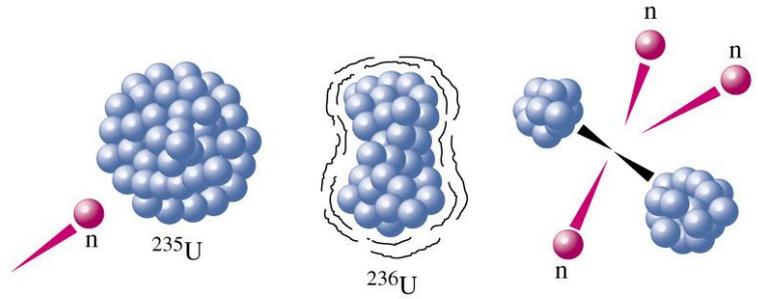
**Mobilisation depuis ~1995**

- Recherche encadrée
- Acteur de l'enseignement
- Expertise académique

- Les recherches ne peuvent pas être contraintes au cadre de la loi  
→ Thématique de recherche « en soi »
- Etudier le comportement des neutrons dans un milieu multiplicateur (un réacteur nucléaire)  
→ Pour améliorer la compréhension, la modélisation et les études prospectives de réacteurs  
→ Pour avoir une vision générale de la problématique et apporter des éléments aux débats
- Pas de prise de position ou pas d'a priori...  
→ Mon exposé ne doit pas en faire ressortir (dans la mesure du possible)

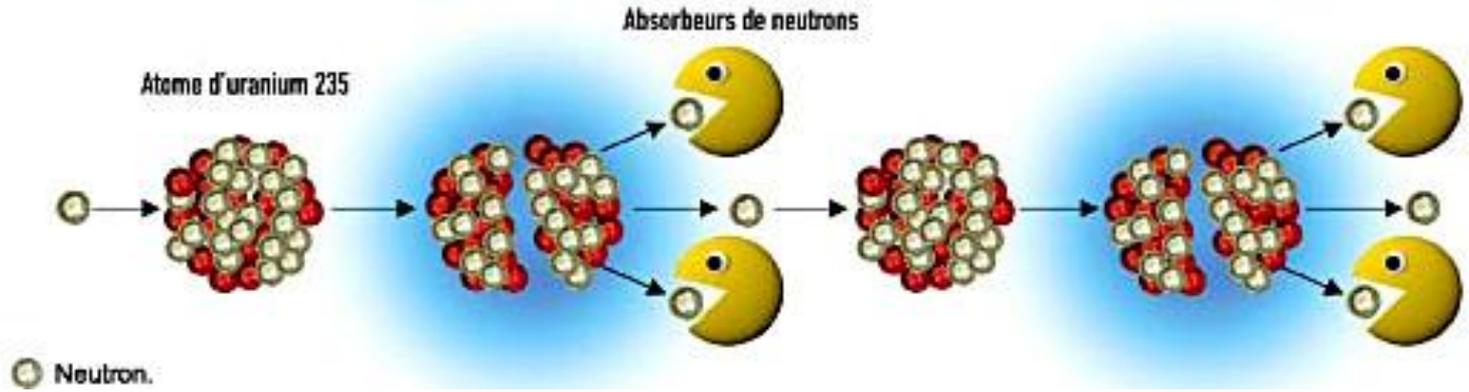
**La thématique est née du débat, gardons cette pratique**

# Ce dont vous vous souvenez !!! (1/2)



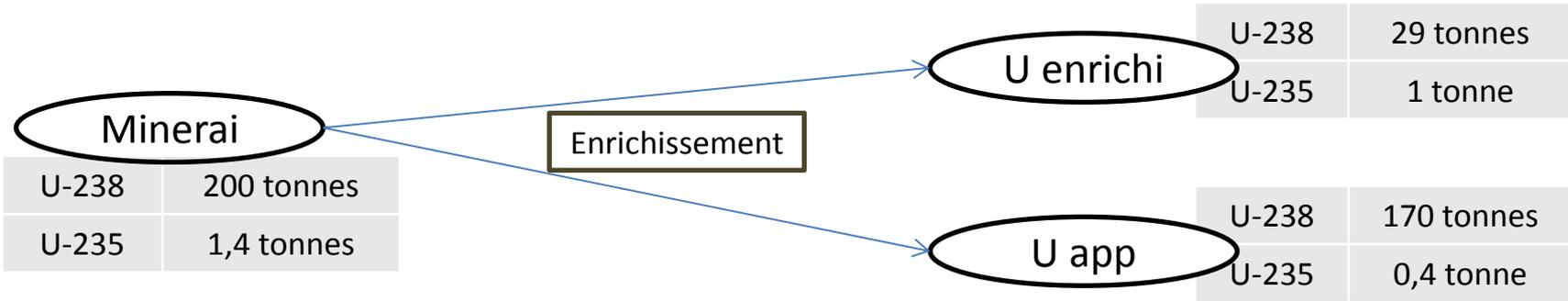
- Les noyaux lourds peuvent fissionner et libérer une grande quantité d'énergie (200 MeV)
- L'U-235 est le seul noyau dans la nature qui peut fissionner quelque soit l'énergie du neutron incident

➤ On peut créer une réaction en chaîne contrôlée de fission



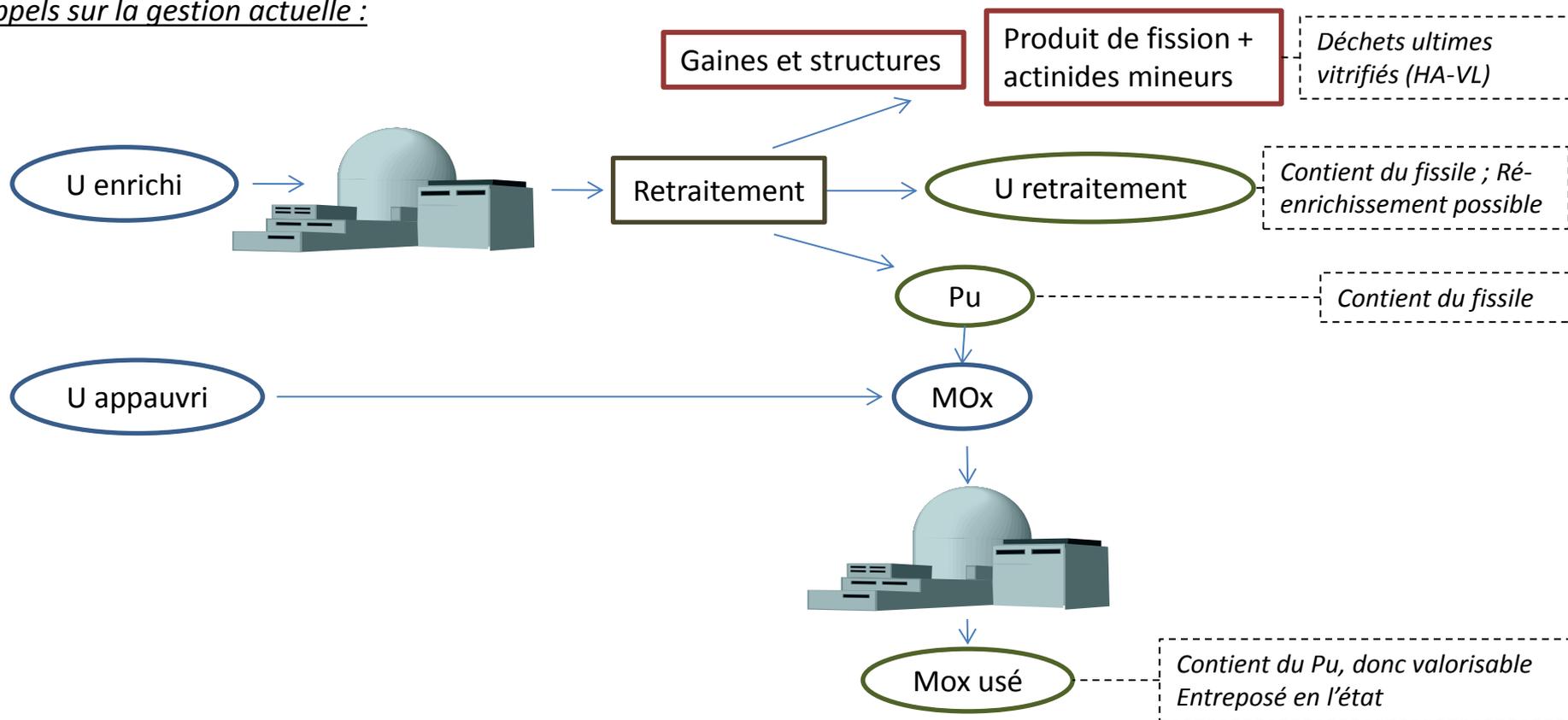
Mais, pour cela, il faut enrichir l'uranium et ralentir les neutrons

- Moins on ralentit les neutrons, plus il faut enrichir le combustible en U-235



# Ce dont vous vous souvenez !!! (2/2)

Rappels sur la gestion actuelle :



- Déchets nucléaires : « Les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée » loi française (2006)
- Il faut **7** assemblages **UOx** pour faire **1** assemblage **MOx** (concentration du Pu et donc de la radiotoxicité)
- Les **MOx usés ne sont pas** considérés comme **des déchets** (car ils contiennent du Pu)  
→ ils sont entreposés en attente de retraitement pour fabriquer le combustible des futurs RNR.

## **1/Physique nucléaire et physique des réacteurs**

De la fission à la réaction en chaîne

Criticité et technologie de réacteurs

L'importance des données nucléaires

## **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 ?

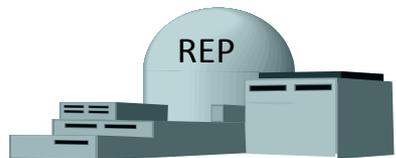
## **Conclusions**

Des ordres de grandeurs qui compliquent le débat

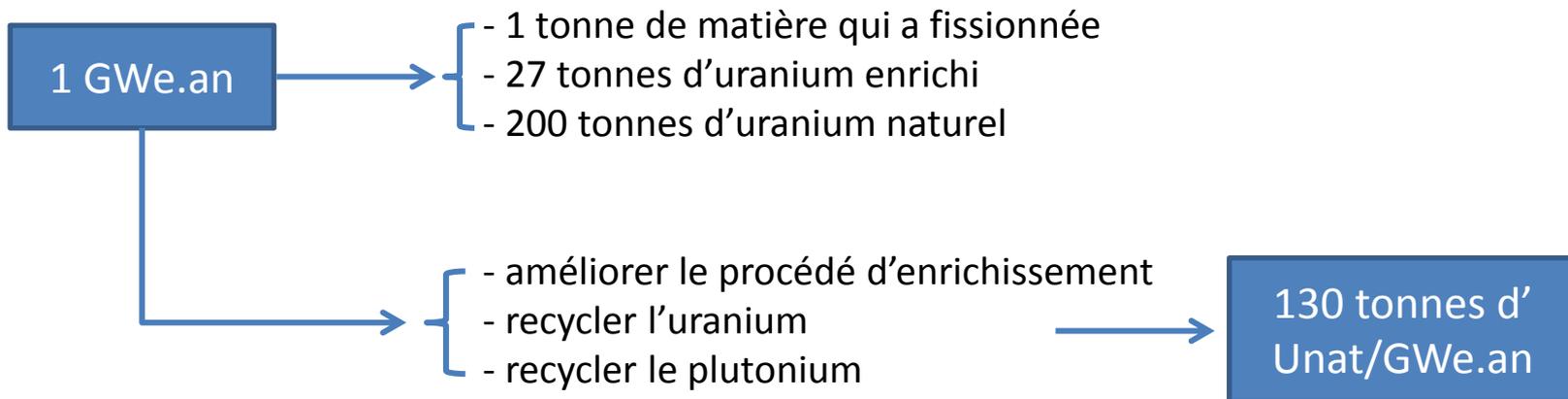
Les projets de réacteurs européens

La place du CNRS/IN2P3 dans le débat

# La valorisation du plutonium



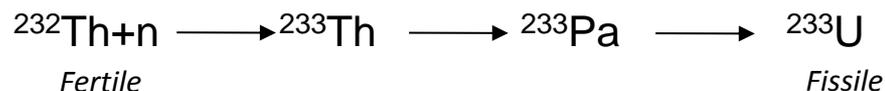
Basé sur l'utilisation de l' $^{235}\text{U}$  (0,7% de l'uranium naturel)



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
$\nu$ neutrons produits par fission	1 neutron pour la fission + $\alpha$ neutron pour la capture sur le fissile + $1 + \alpha$ neutrons sur le fertile

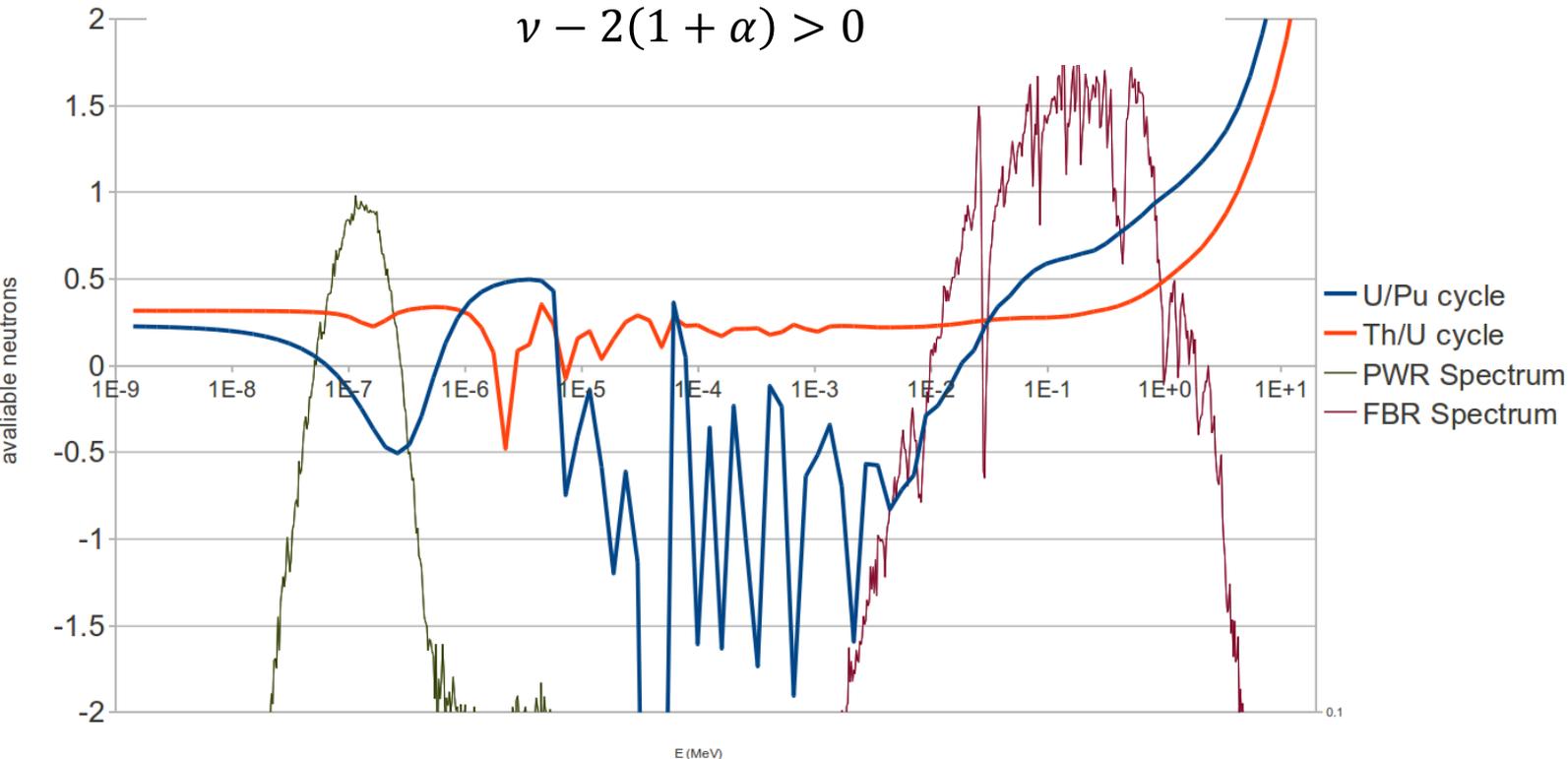
$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$  est le nombre de neutron  
capturé pour une fission

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

Il faut produire  $1 + \alpha$  noyau fissile

Pour que la régénération soit possible il faut que :

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



# Réacteurs du futur ou du passé ?

- EBR 1 : premier réacteur connecté au réseau (1951 – 1964)



Experimental  
Breeder  
Reactor



Résultat de l'époque entre compromis  
enrichissement/technologie

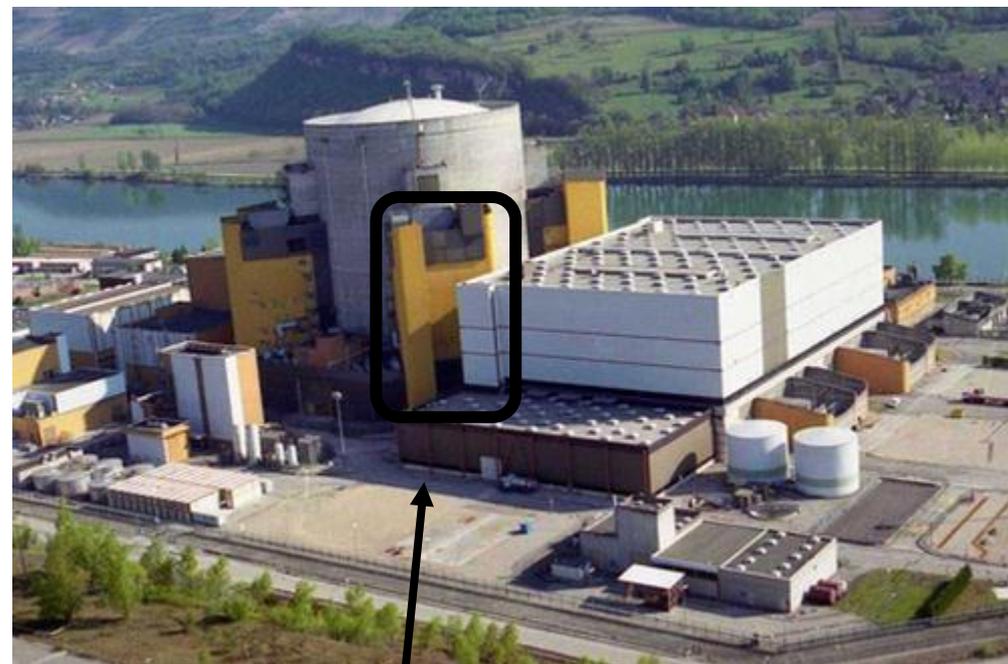
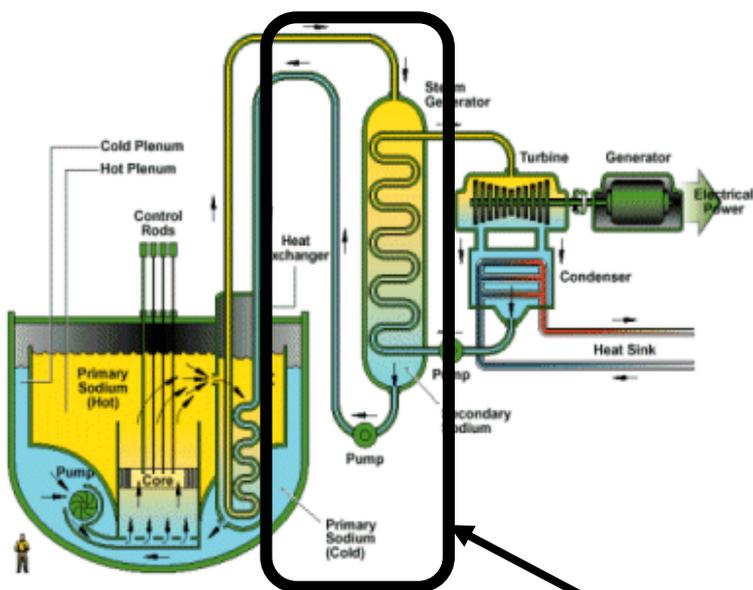
- SuperPhénix (1985 – 1997)

La France a plus d'expérience dans le  
démantèlement des réacteurs aux sodiums de  
1200 MW<sub>e</sub> que dans les REP actuel



# 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

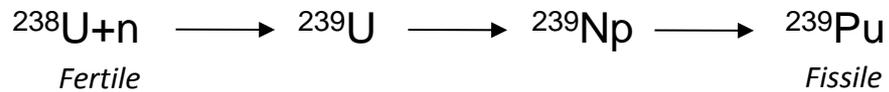
### ➤ Mais le sodium n'est pas stable avec l'air ni l'eau

- 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

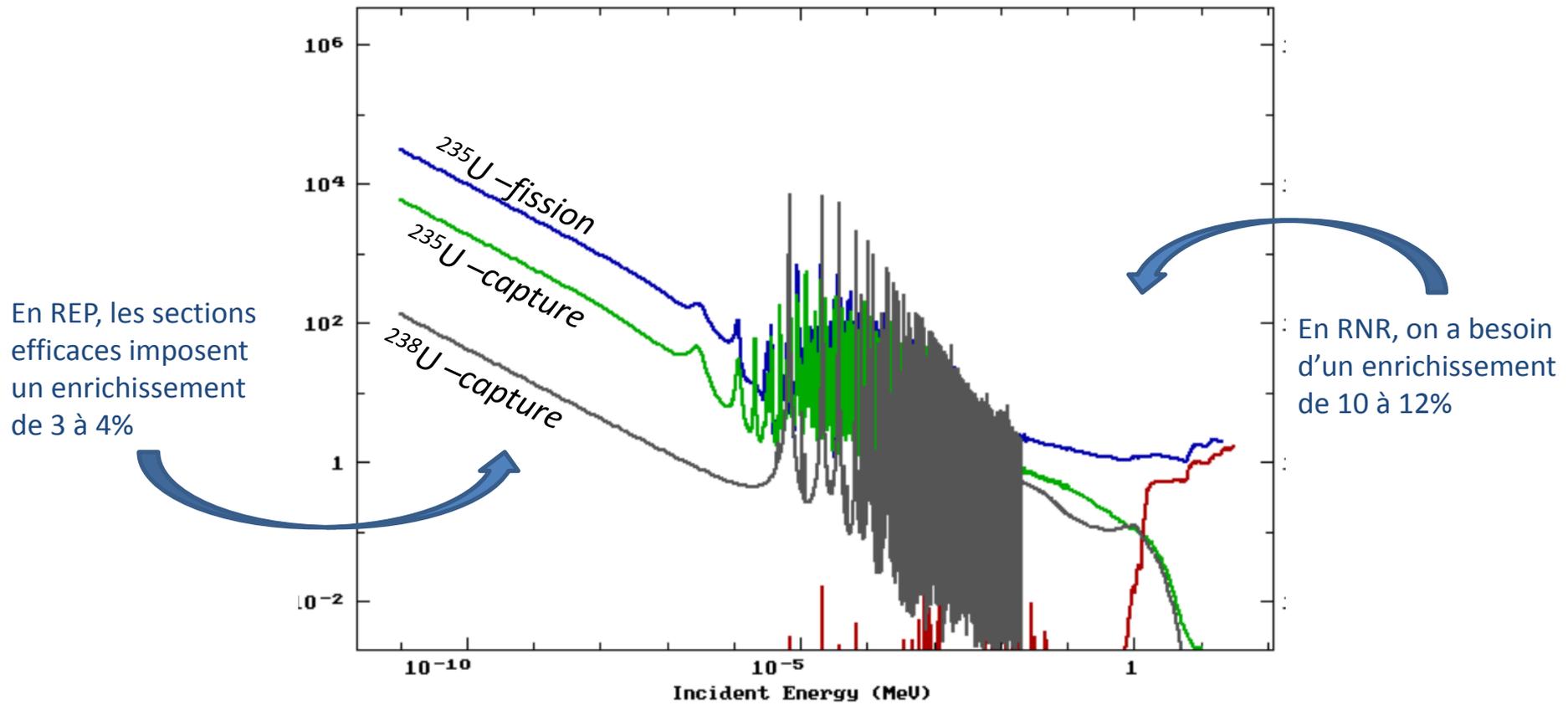
# La problématique de l'inventaire initial



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

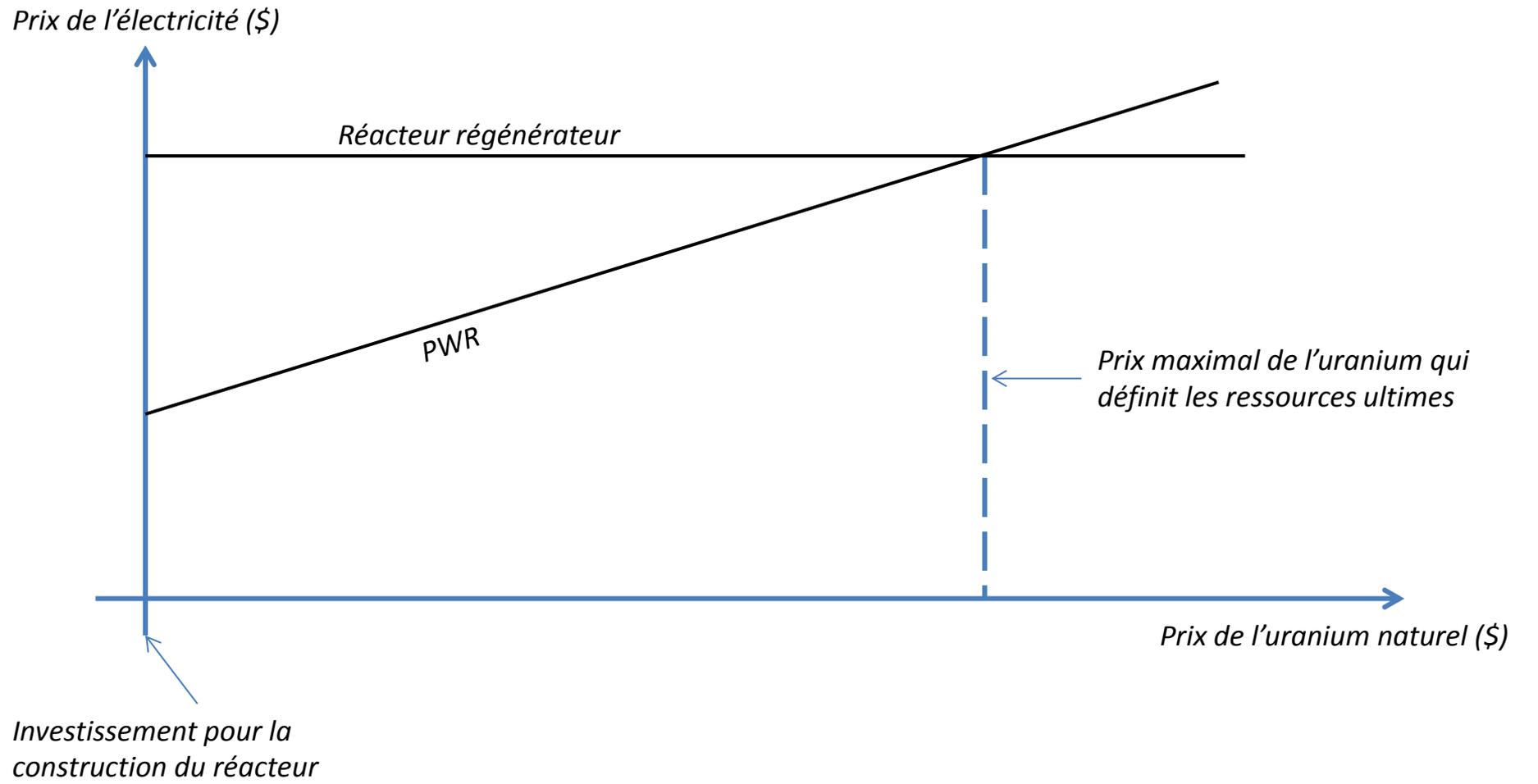


En REP, les sections efficaces imposent un enrichissement de 3 à 4%

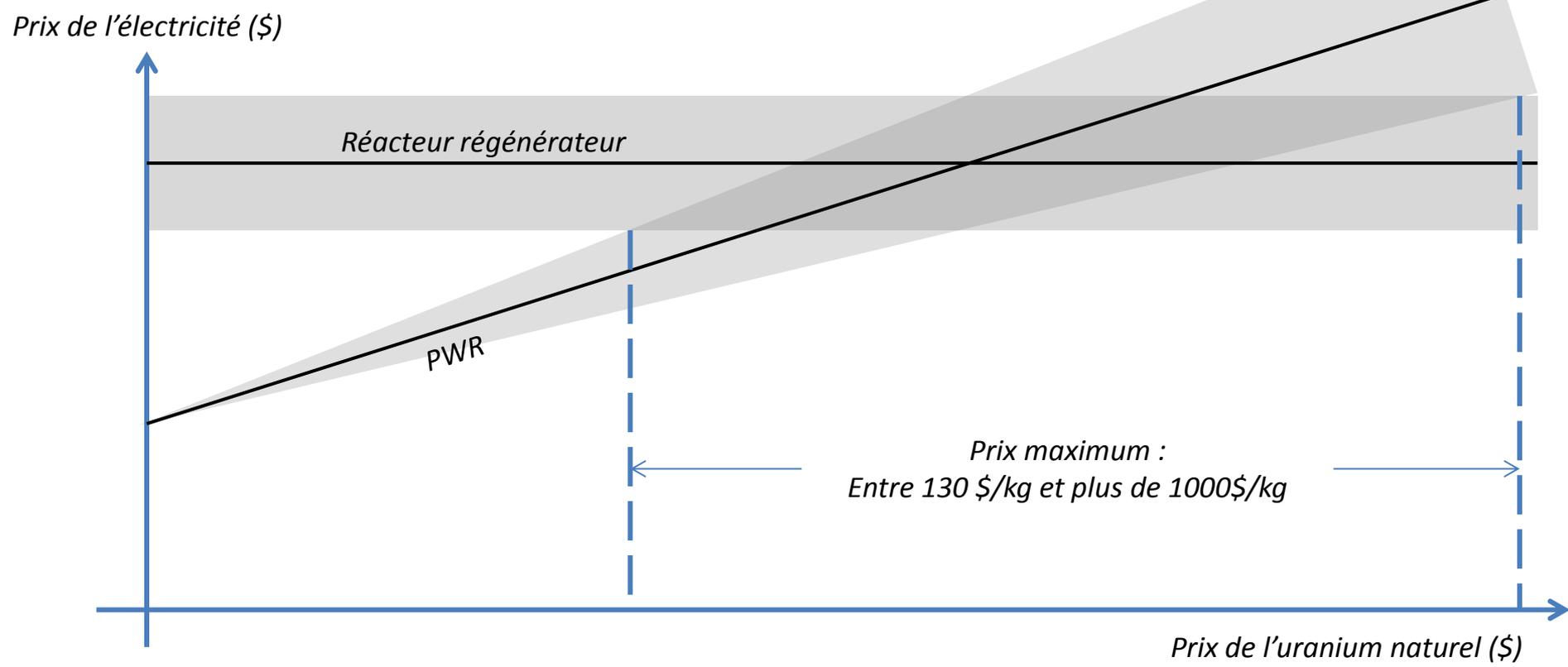
En RNR, on a besoin d'un enrichissement de 10 à 12%



# 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

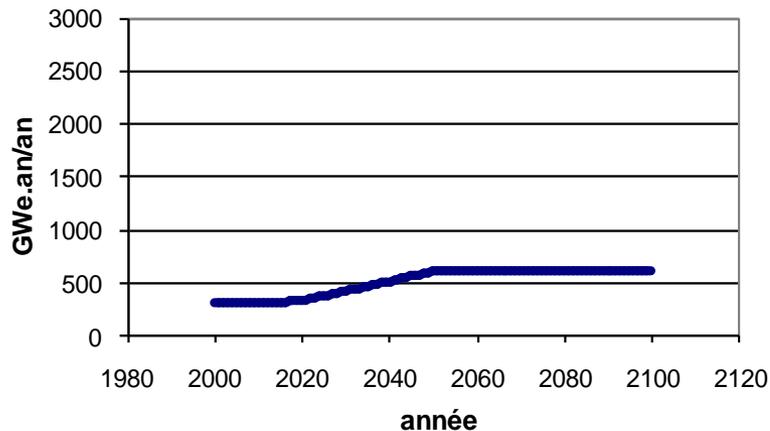
AIEA 16

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

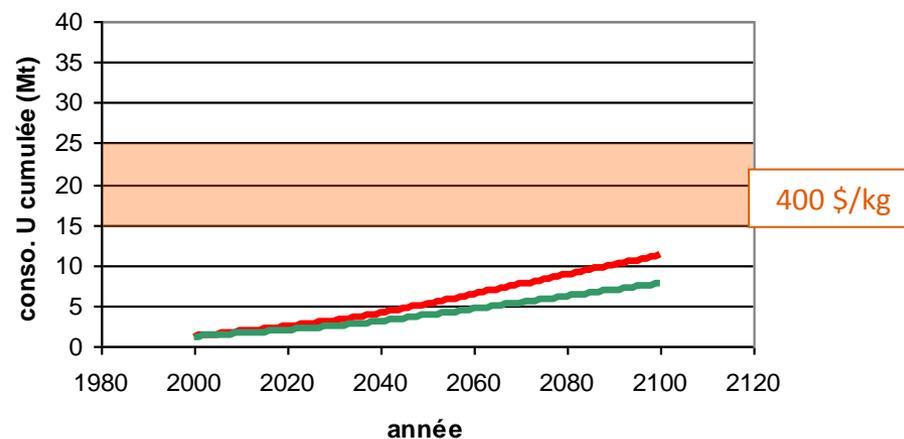
➤ Aujourd'hui:

- 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

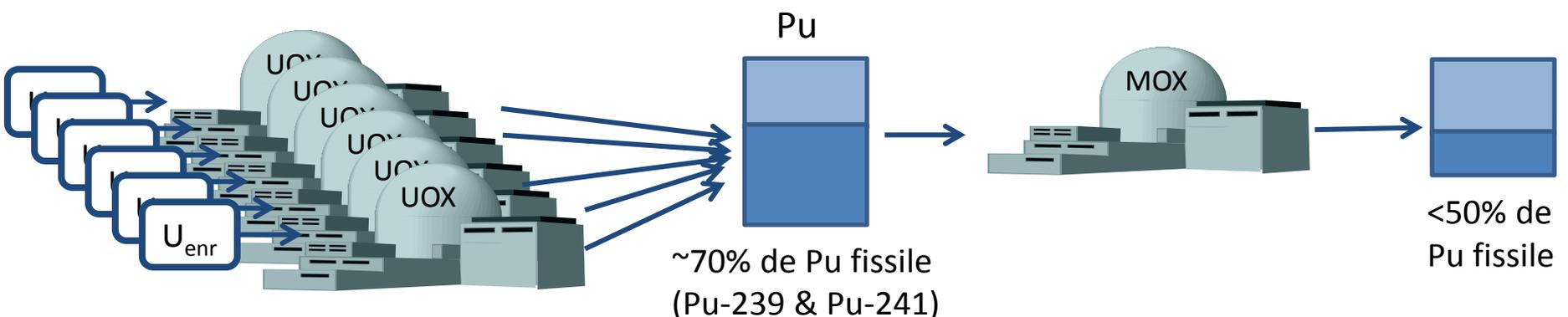
Si on a besoin rapidement des RNR (avant 2100), il faut économiser le plutonium

**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 !**

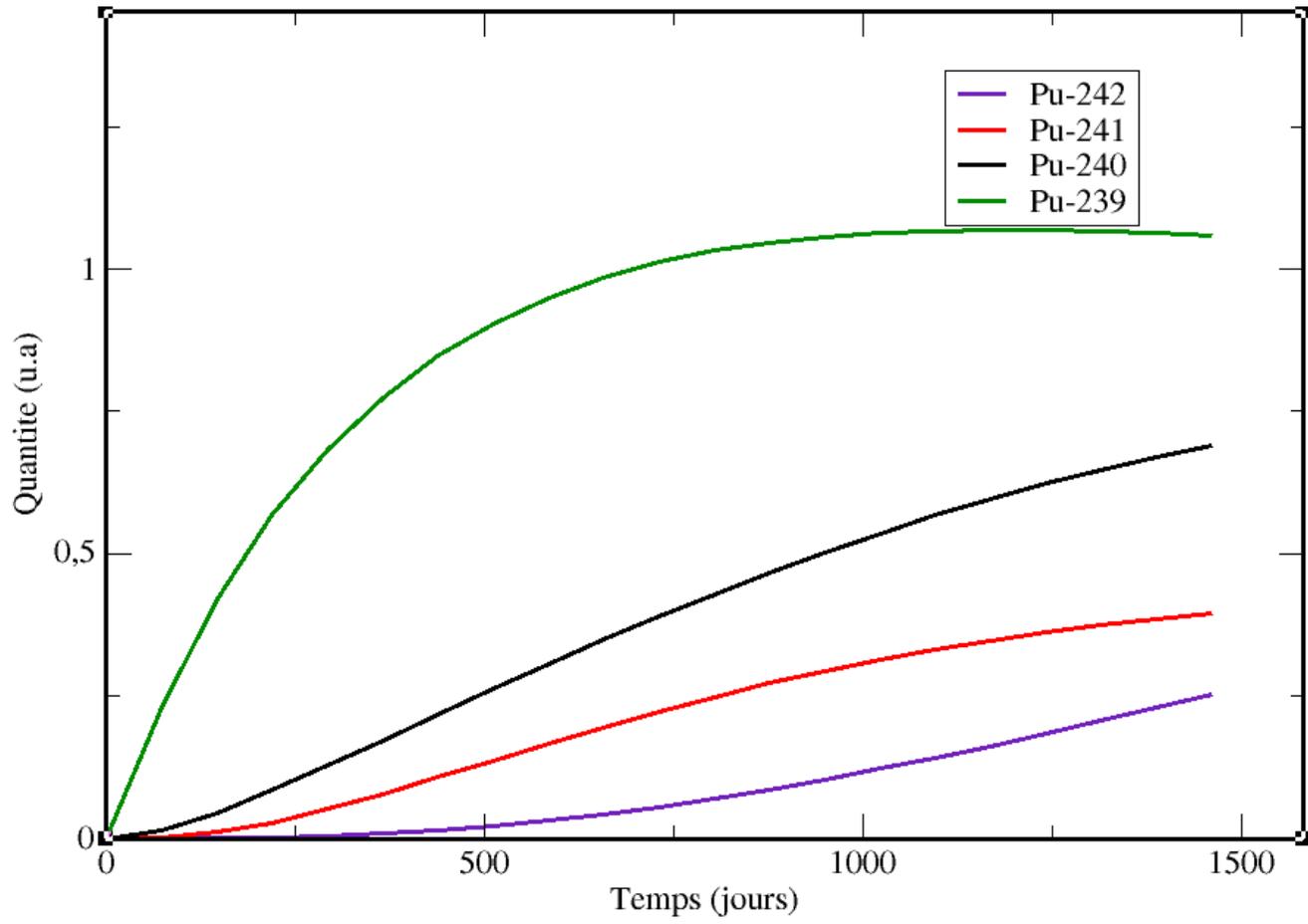
→ *Maintien des compétences industrielles*



# L'impact du MOX dans les REP

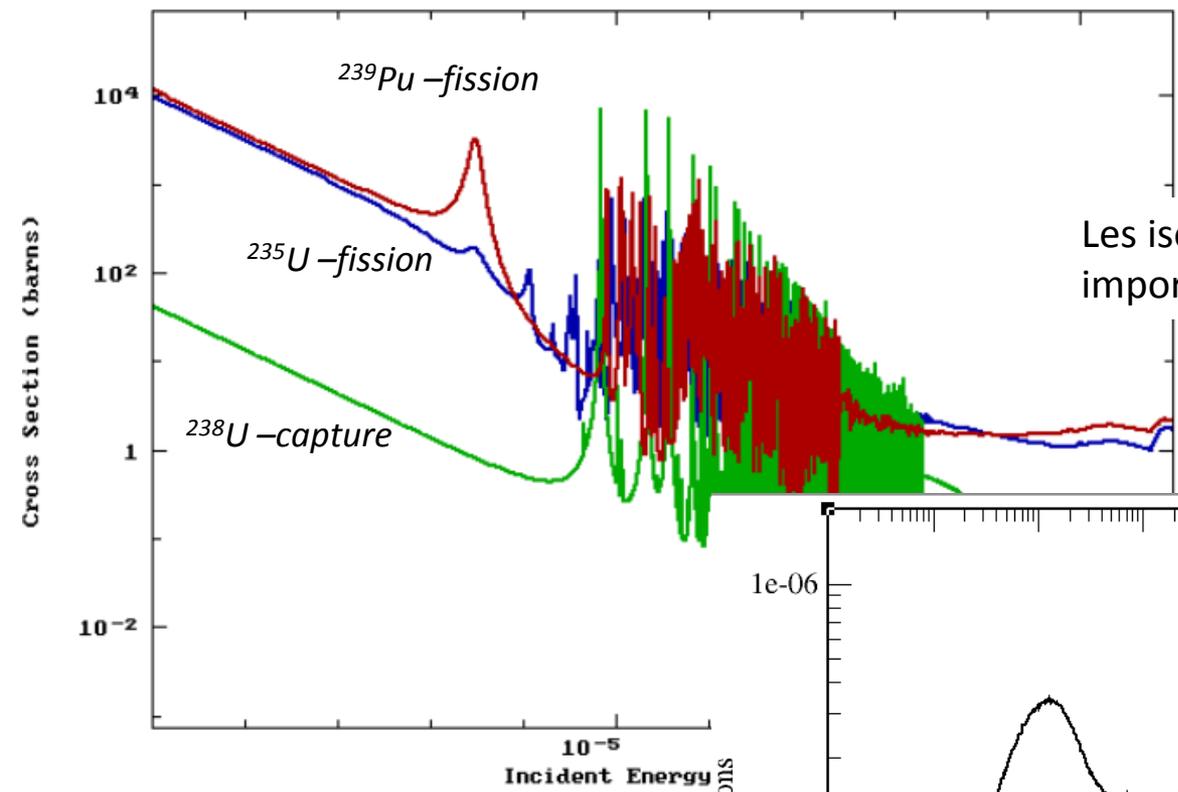
L'évolution des quantités :  $Variation = \frac{dN}{dt} = production - disparition$

$$\frac{dPu^9}{dt} = capture\ sur\ l'U^8 - réaction\ neutronique\ sur\ le\ Pu^9$$

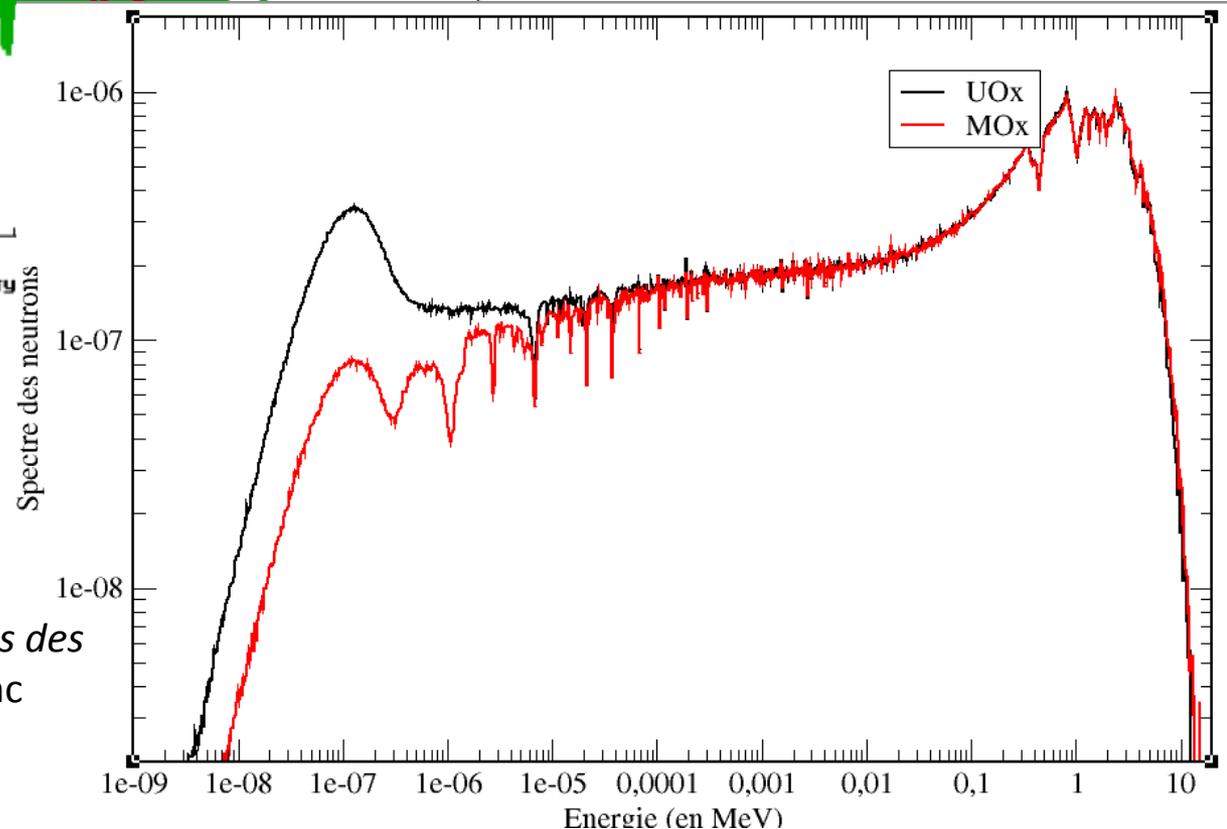


Evolution vers un équilibre pour tous les équilibres

# 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 importantes) et il faut donc enrichir d'avantage !

## 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

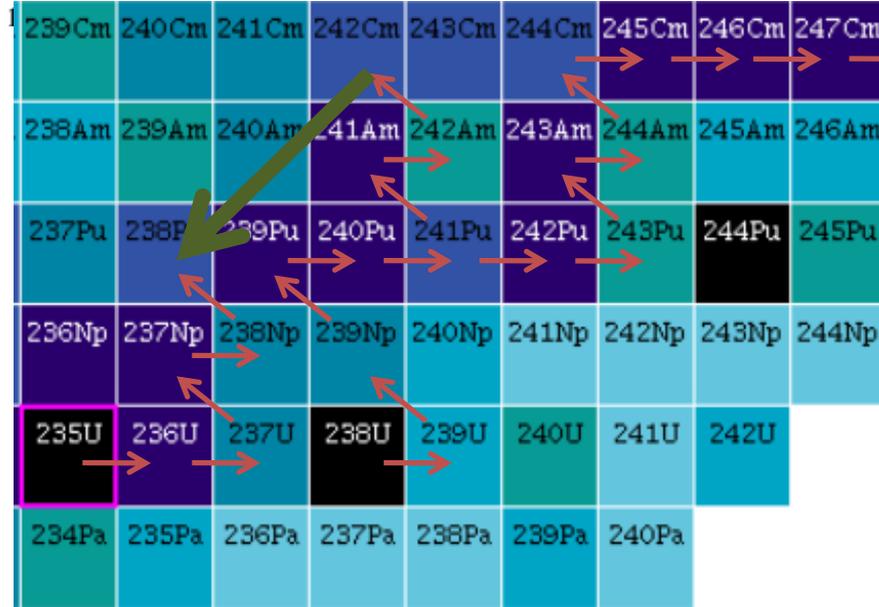
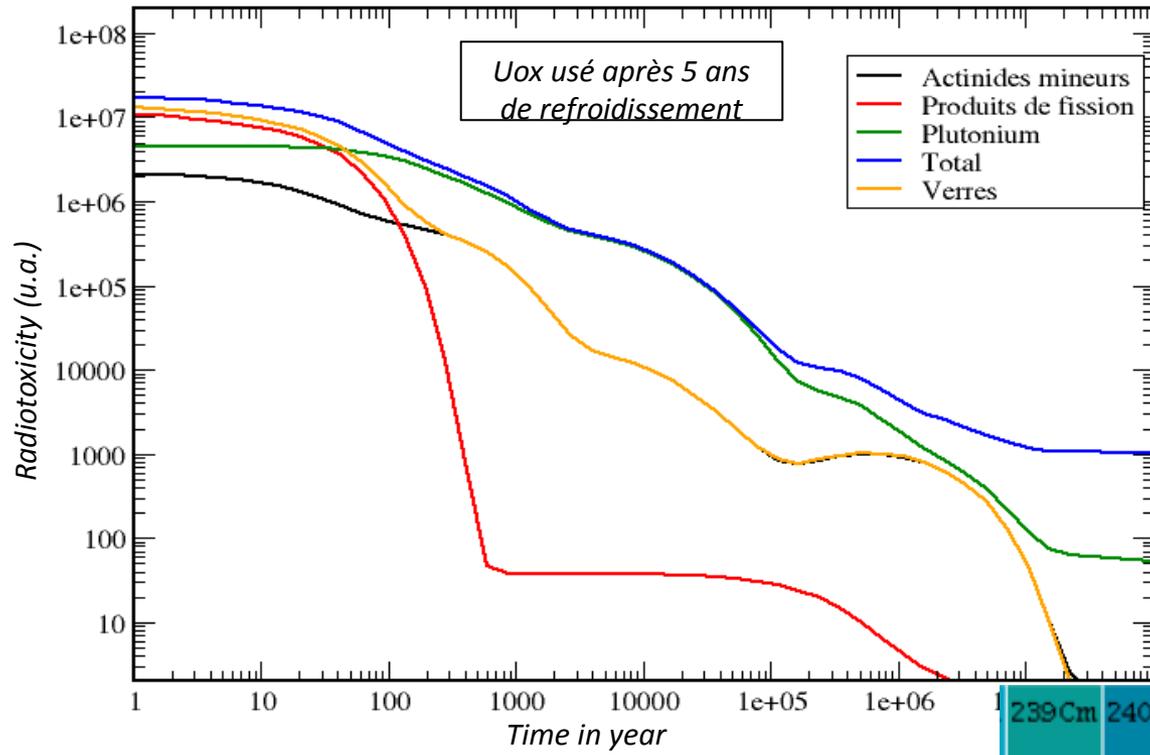
**4/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation**

Qu'est ce que c'est ?

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

Conclusions

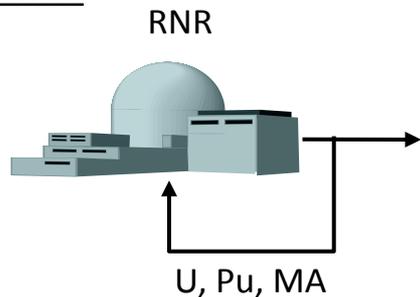
# La transmutation : qu'est ce que c'est ?



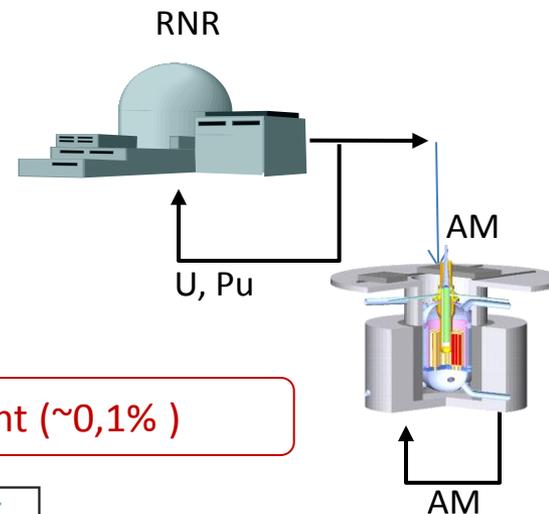
# Transmutation des actinides mineurs

## Deux stratégies différentes

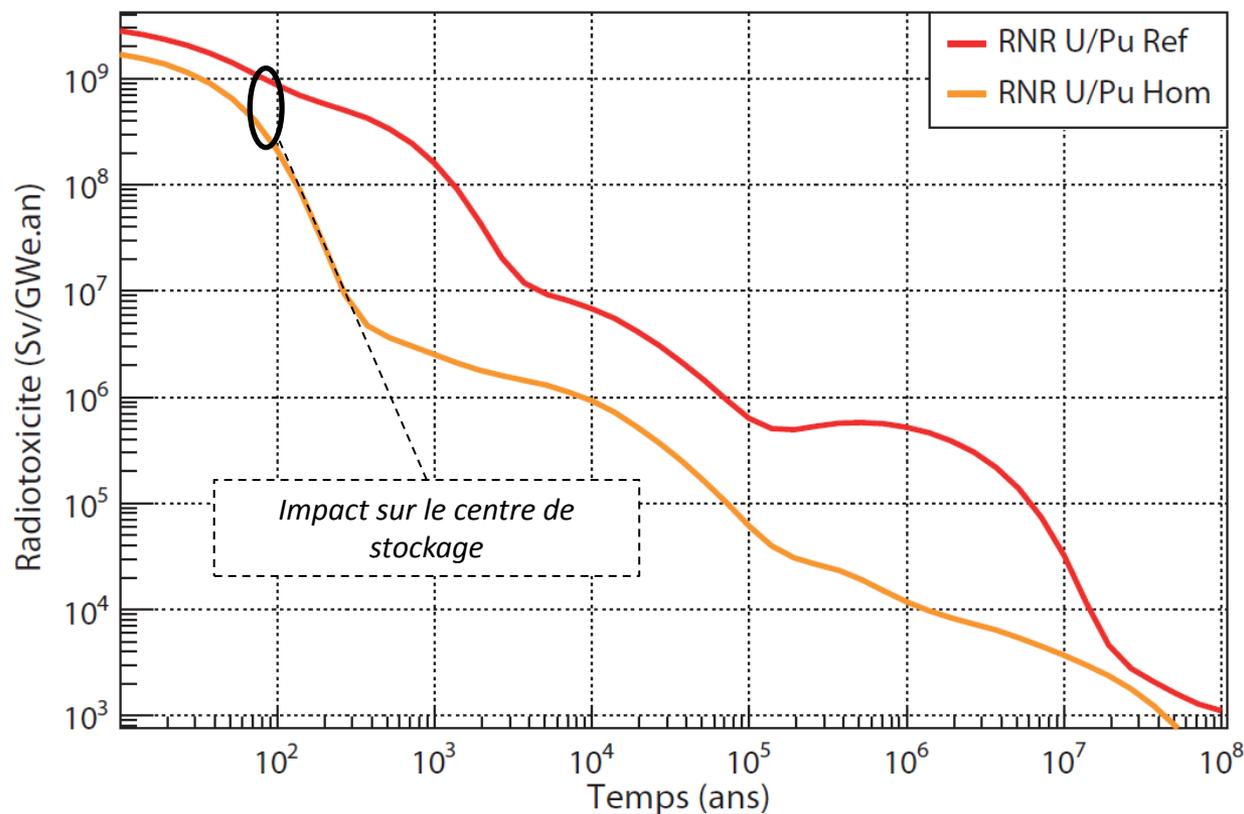
➤ Dans RNR



➤ ADS →  
scénario  
double strate

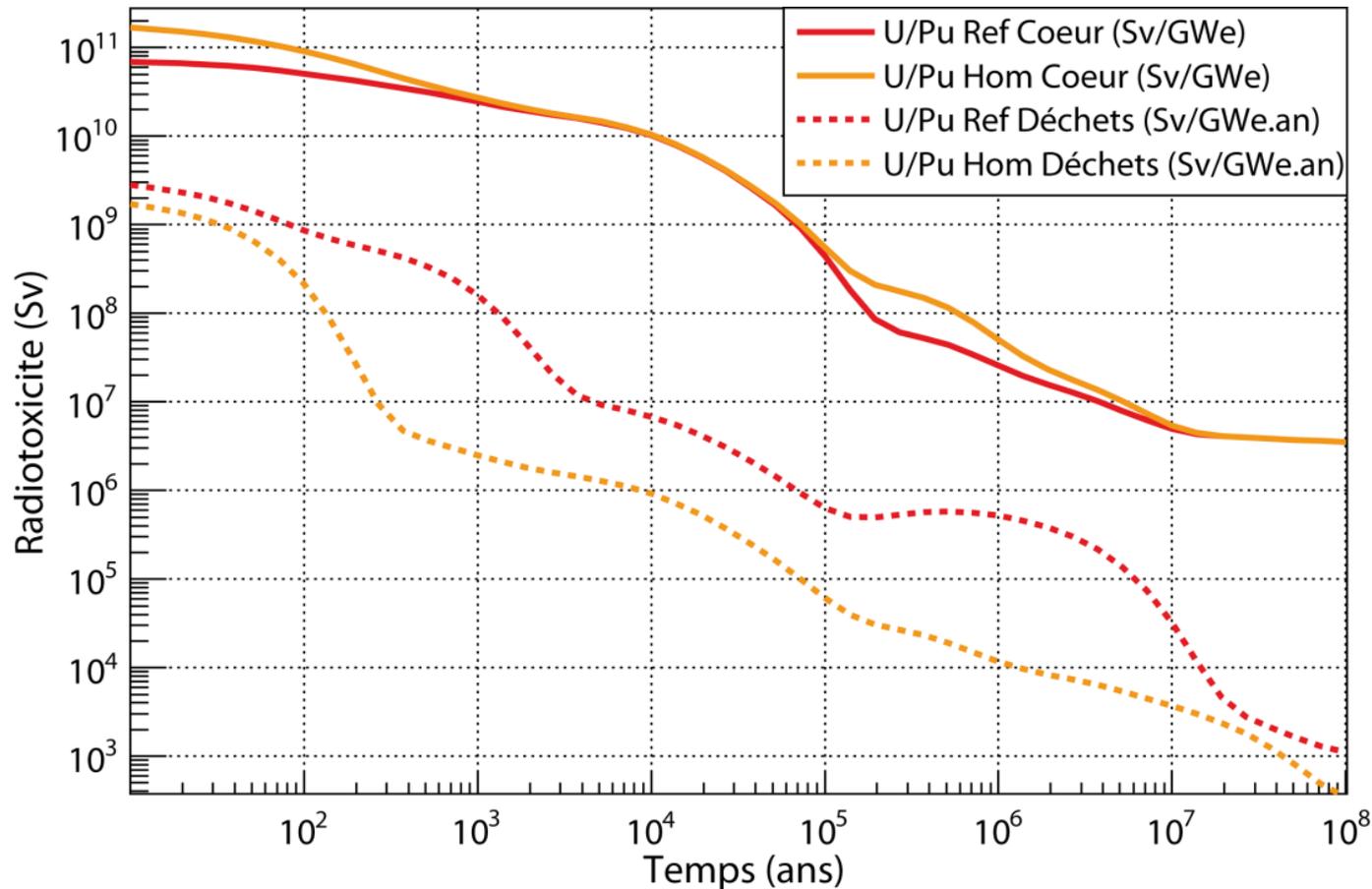


Déchets ↔ PF + pertes chimiques au retraitement (~0,1%)



- 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 :

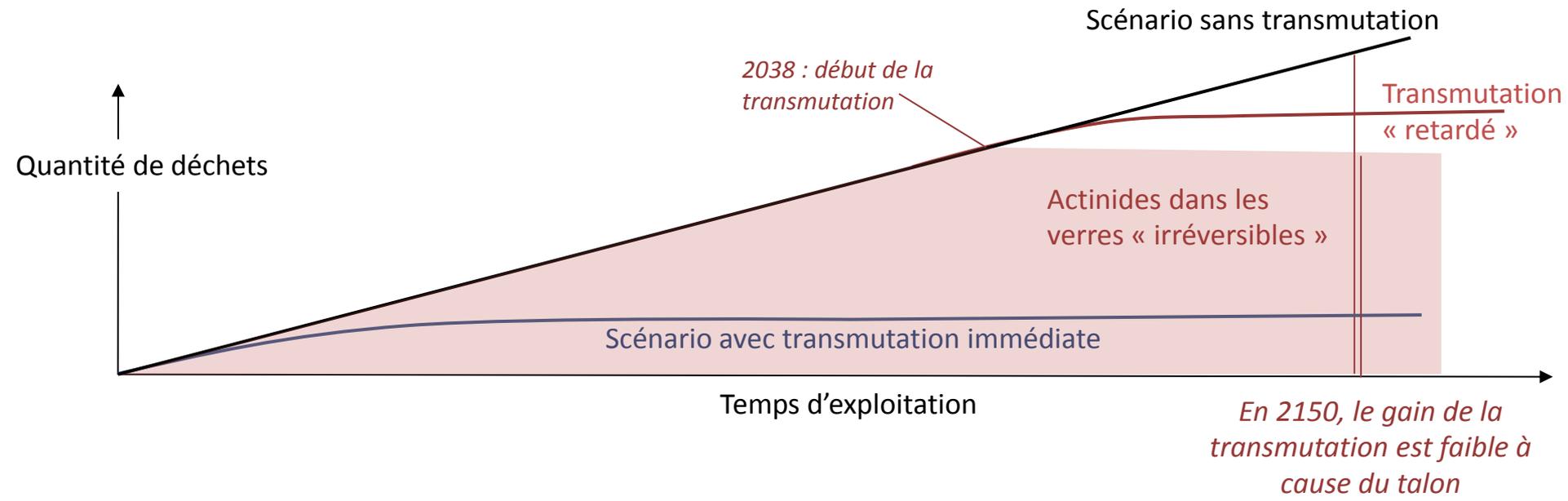
	Confiance dans la société	Oui	Non
Promoteur-nucléaire	Pour un développement durable du nucléaire	X	
	Pour la transmutation		X
« Anti-nucléaire »	Pour un développement durable du nucléaire		X
	Pour la transmutation et/ou entreposage	X	

## 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 ?**

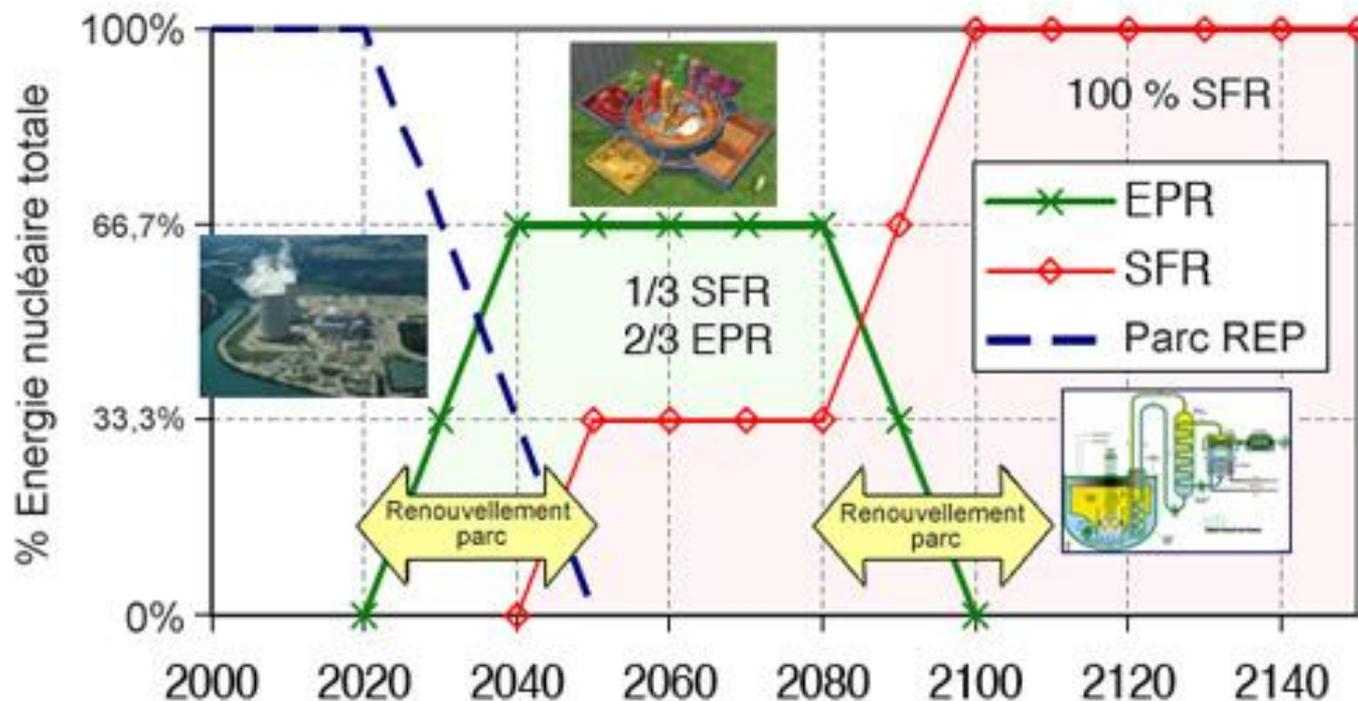
L'importance des scénarios pour les décisions

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

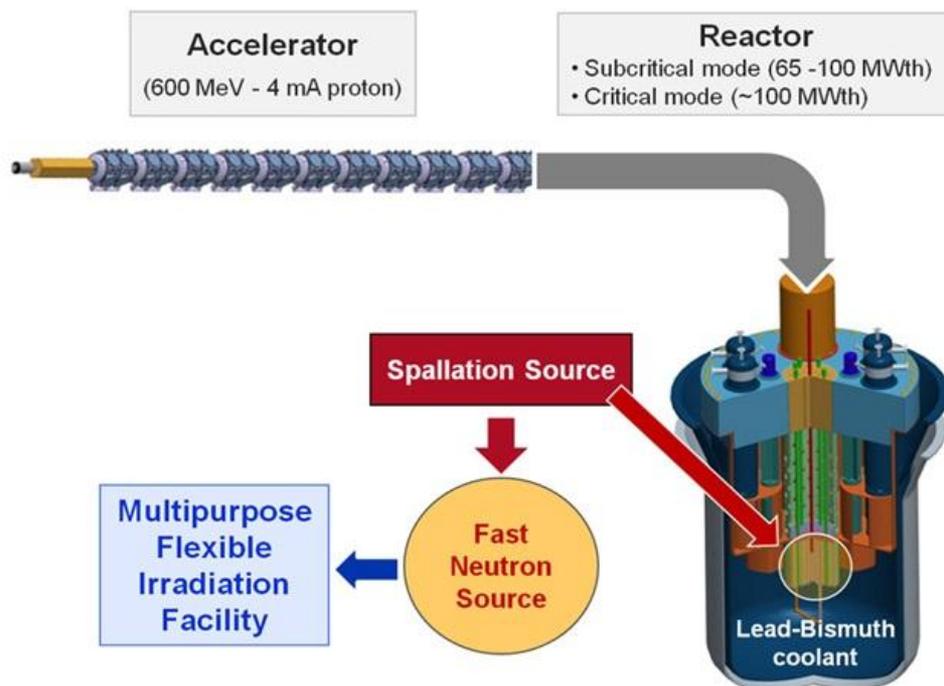
## ➤ Cycle du thorium

## ➤ 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
- ...

# A l'échelle européenne : deux grands projets

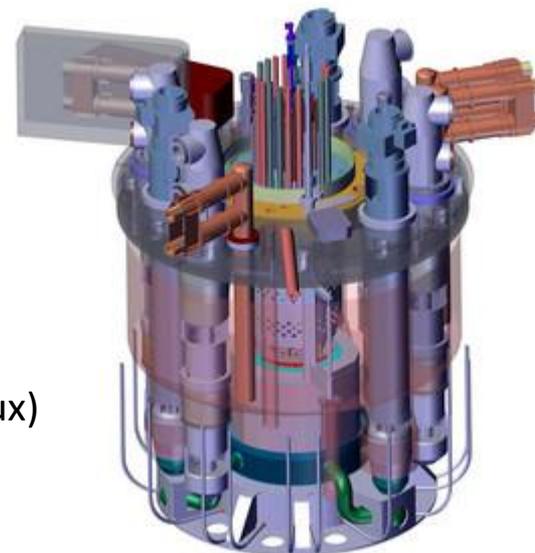


## ***MYRRHA (SCK-CEN ; Belgique)***

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

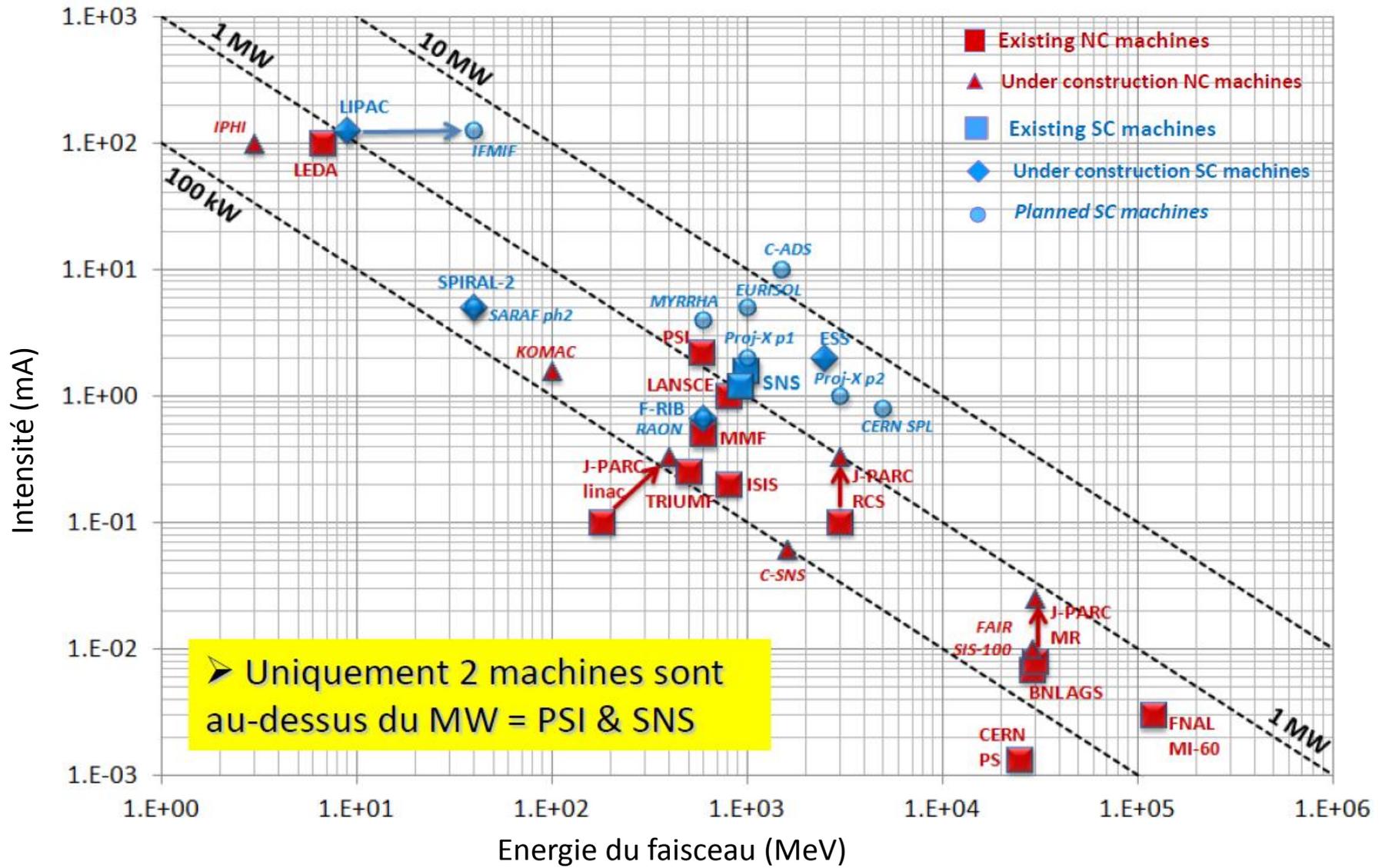
## ***ASTRID (CEA ; France)***

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



# La faisabilité de MYRRHA dépendra des équipes IN2P3

**Puissance du faisceau : 2,4 MW** (~ aux machines les plus puissances du moment)  
... Mais couplé à un réacteur

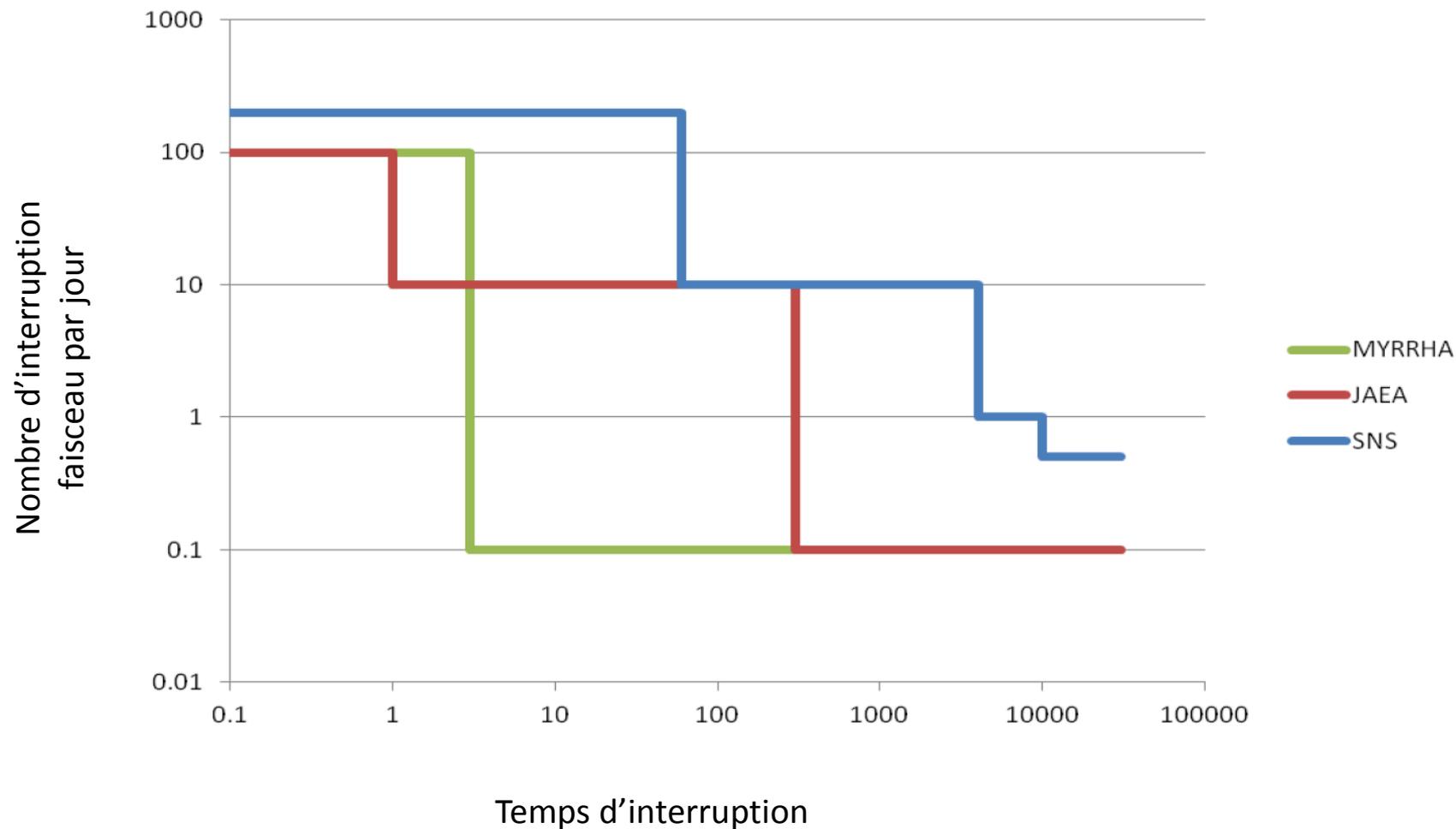


# La faisabilité de MYRRHA dépendra des équipes IN2P3

... qui demande une fiabilité extrême de l'accélérateur

Nombre d'interruption faisceau de plus de 3 sec.

10 max pour chaque campagne (3 mois)





*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