

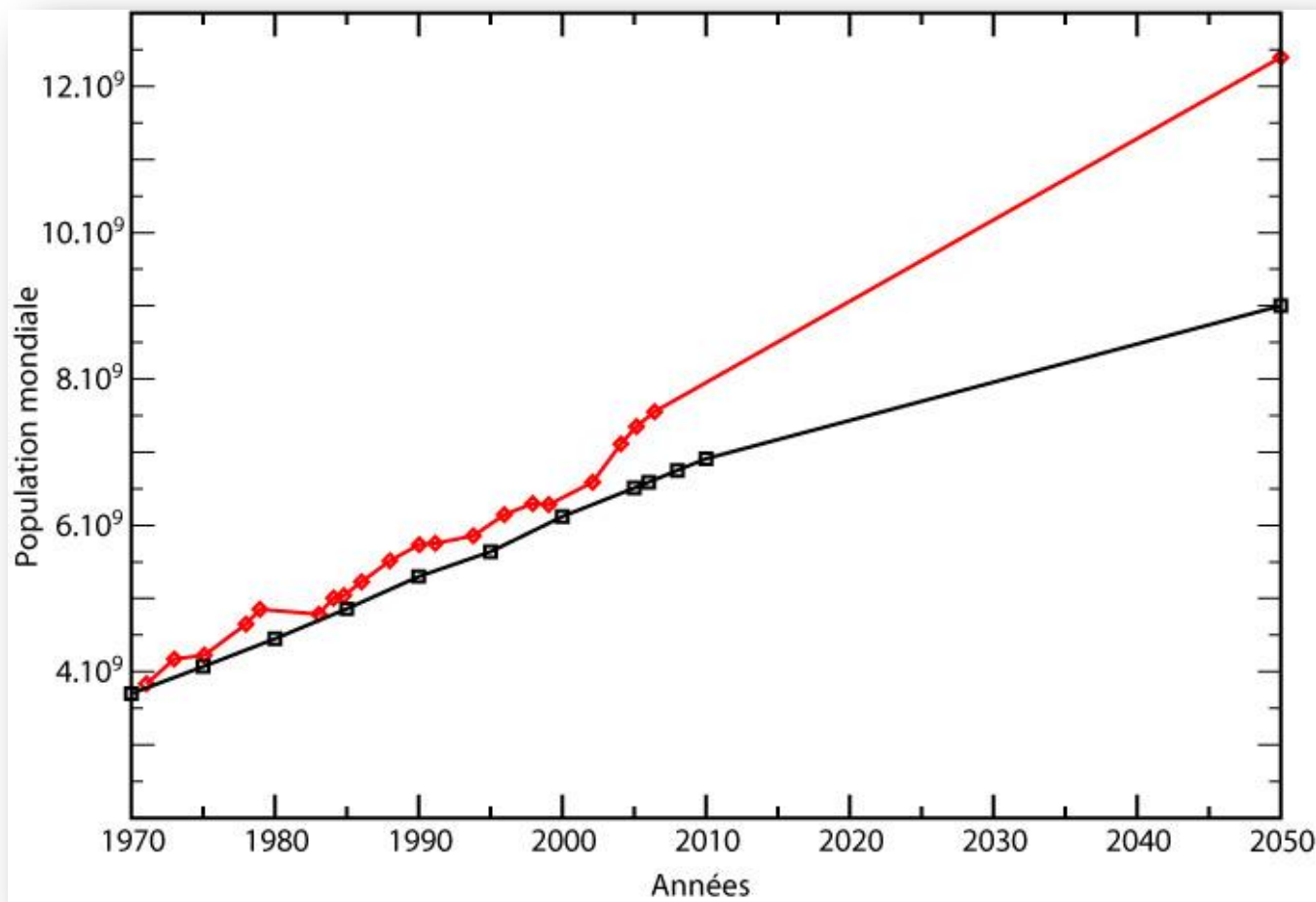
Maitriser l'énergie de l'atome : Défis et enjeux

Rencontre des deux infinis
15 - 25 juillet 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
- France → 1000 W

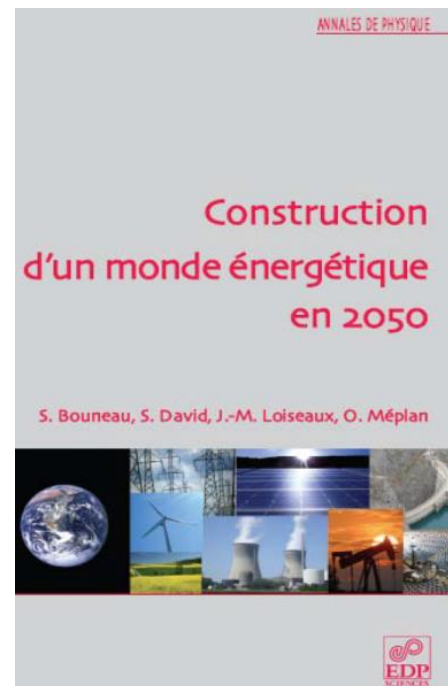
En 2050 :

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



Contrainte économique (développement)
Contrainte démographique
Contrainte climatique

- 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

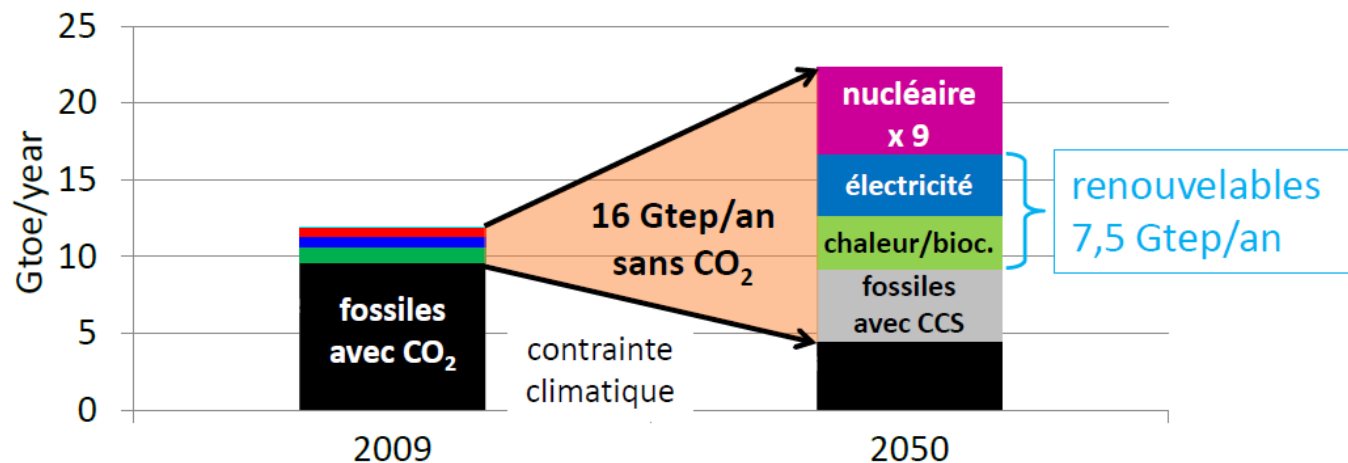


Hypothèses : 3 contraintes

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

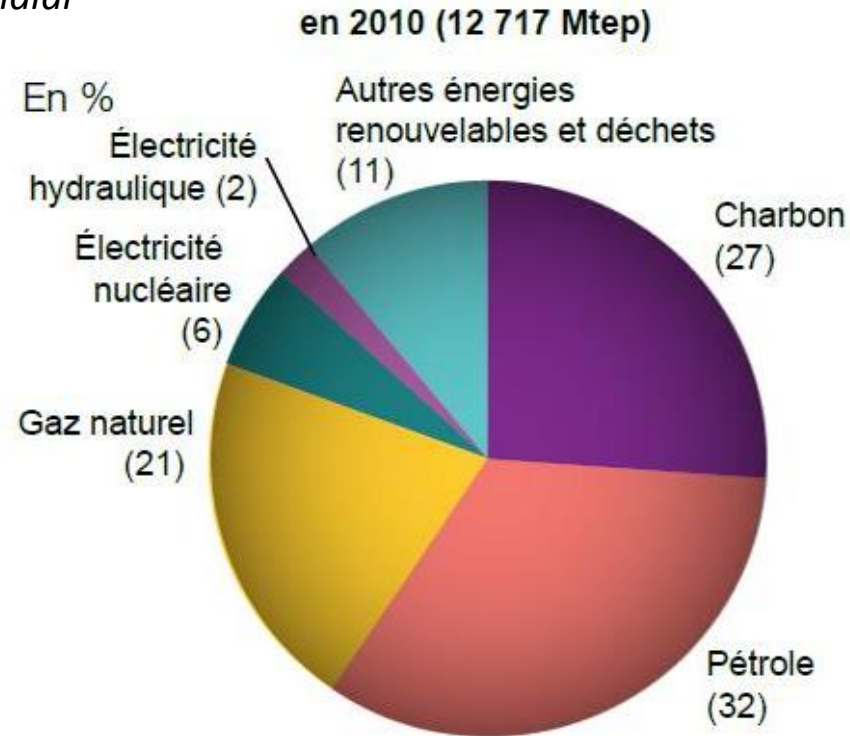
Variable d'ajustement :

- Part du nucléaire en 2050



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

Mix énergétique primaire mondial

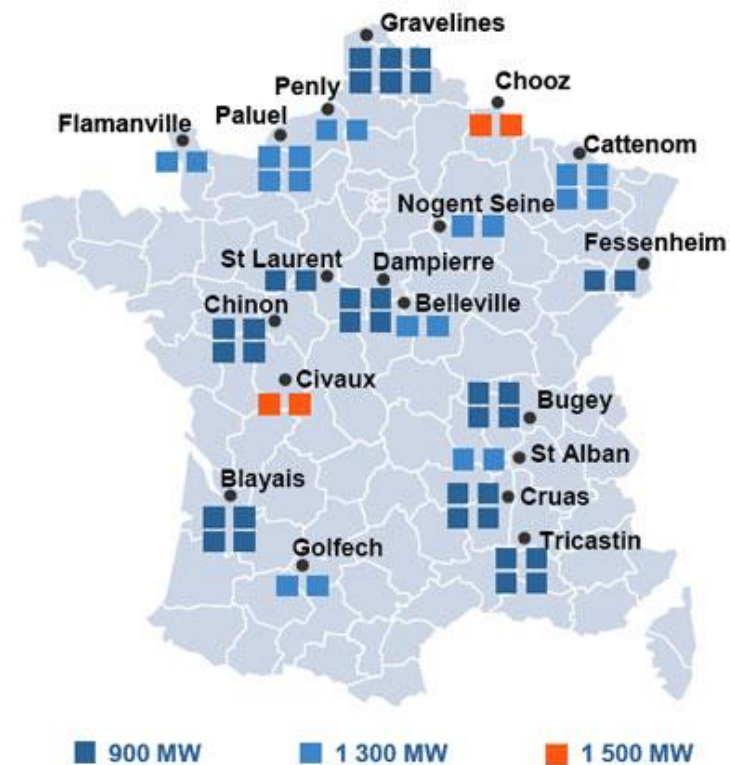


Source : Agence internationale de l'énergie, octobre 2012

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

1/ Les ordres de grandeurs qui font mal

La fission

La réaction en chaîne

2/ Un peu de sûreté

Les effets de la radioactivité

La sûreté nucléaire ou la défense en profondeur

3/ Les déchets nucléaires

Qu'est ce qu'un déchet ?

Le procédé de retraitement

Le débat CIGEO

4/ Les ressources en uranium naturel

La valorisation du plutonium

Compétition GENIII-GENIV

5/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

Qu'est ce que c'est ?

Deux stratégies

Un choix futur fortement impacté par les décisions d'aujourd'hui

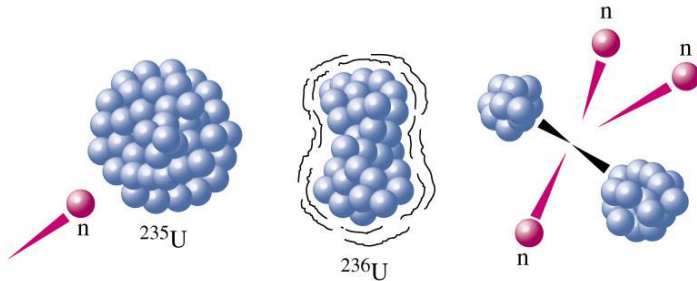
6/ Conclusions

L'importance des scénarios pour les décisions

Les projets de réacteurs européens

Une problématique qui dépend de la futur demande

Les ordres de grandeurs qui font mal



→ Une fission libère **200 MeV**

→ La combustion d'une molécule de gaz naturel libère **8,37 eV** $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 8.37 \text{ eV}$

→ Sachant qu'un Français consomme en moyenne 1 kW, quelle masse de combustible est-elle nécessaire ?

$$1000 \text{ W moyen} \approx 9000 \text{ kWh/an} = 32 \text{ GJ chaque année}$$

$$200 \text{ MeV} = 200 \cdot 10^6 \times 1.6 \cdot 10^{-19} = 3.2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

$$8.37 \text{ eV} = 1.3 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

$$\rightarrow 32 \cdot 10^9 / 3.2 \cdot 10^{-11} = 10^{21} \text{ fissions} = \mathbf{0.4 \text{ gramme}}$$

$$\rightarrow 32 \cdot 10^9 / 1.3 \cdot 10^{-18} = 4.1 \cdot 10^{28} \text{ molécules} = \mathbf{1 \text{ tonne}}$$

Attention, il manque un facteur 3 !

→ Un réacteur pour ~1,1 million de petits Français

→ Combien de matière consommée ? Combien de produits de fission ?

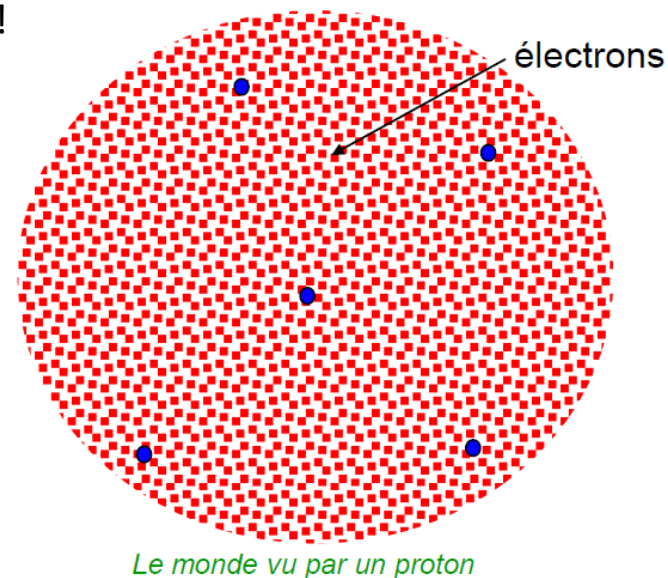
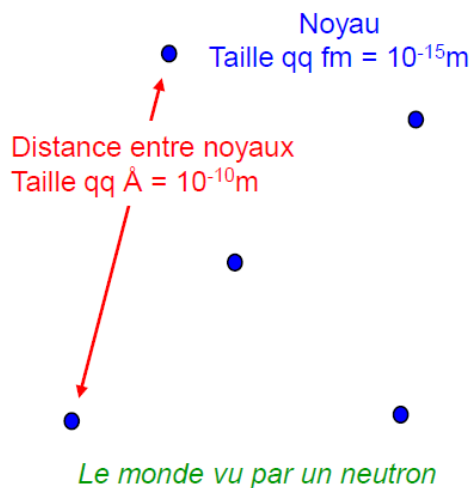
$$32 \text{ GJ/hab} \times 1,1 \cdot 10^6 = 3,52 \cdot 10^{16} \text{ GJ} \rightarrow \text{Environ 1 tonne de fission}$$

$$c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$M_{\text{disparu}} = E_{\text{fissioné}} / c^2 = 3 \times 3,52 \cdot 10^{16} / 9 \cdot 10^{16} = 1 \text{ kg}$$

→ Environ 1g de produits de fission par habitant et par an !

Un neutron parcourt une distance infiniment grande dans la matière !



Le libre parcours moyen du neutron est défini comme l'inverse de la section efficace macroscopique

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma^{\text{tot}}} = \frac{1}{N_{\text{atomes}} \cdot \sigma^{\text{tot}}} \sim \text{plusieurs cm}$$

Pour engendrer une fission, le neutrons doit se *balader* dans un milieu de taille macroscopique



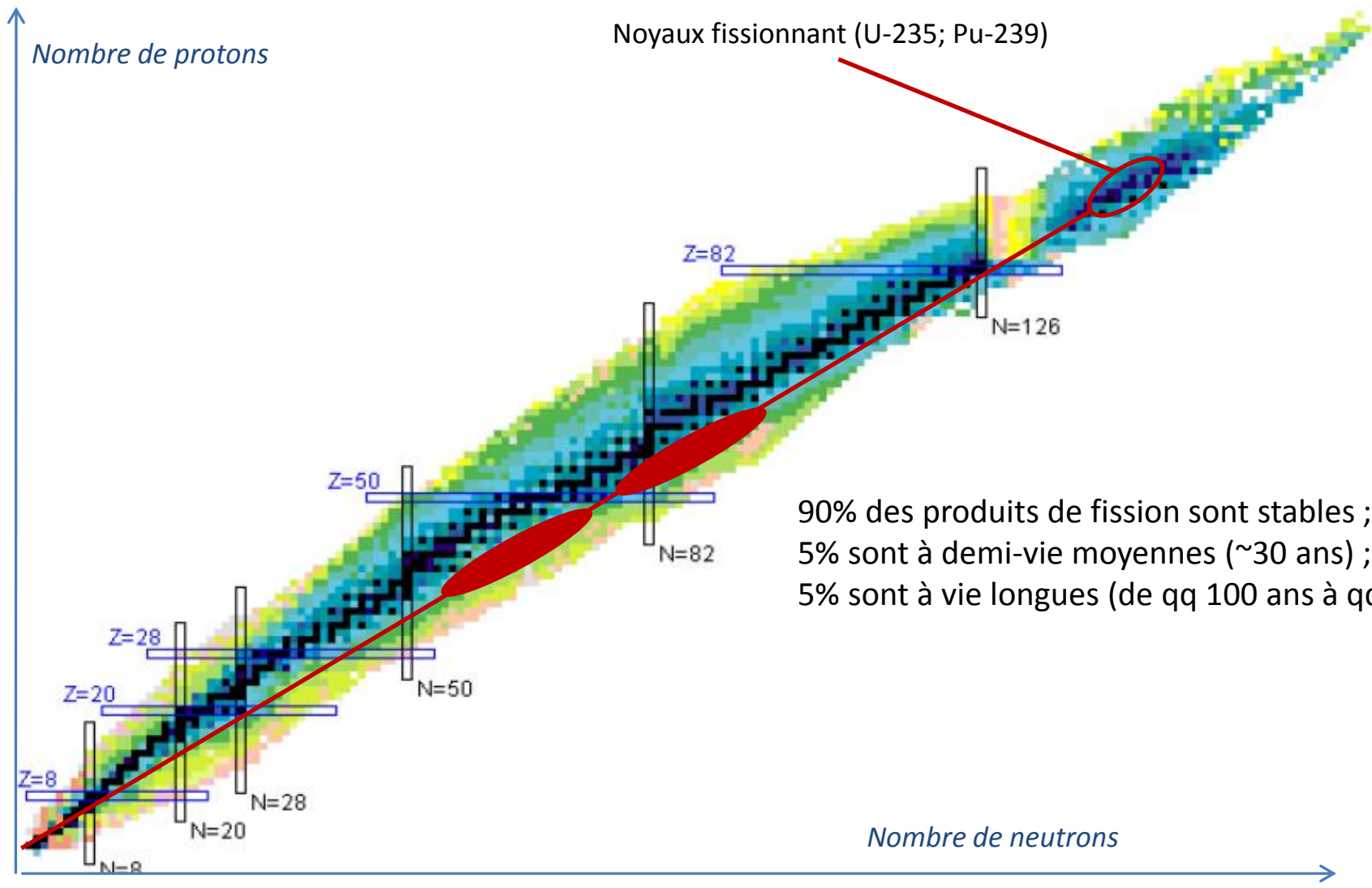
L'uranium naturel est composé de 0,7% d' ^{235}U , seul isotope naturel fissile

→ Il faut enrichir le combustible

→ Un réacteur représente 80 tonnes de combustible
pour une tonne de fission

L' ^{238}U interagit aussi avec les neutrons

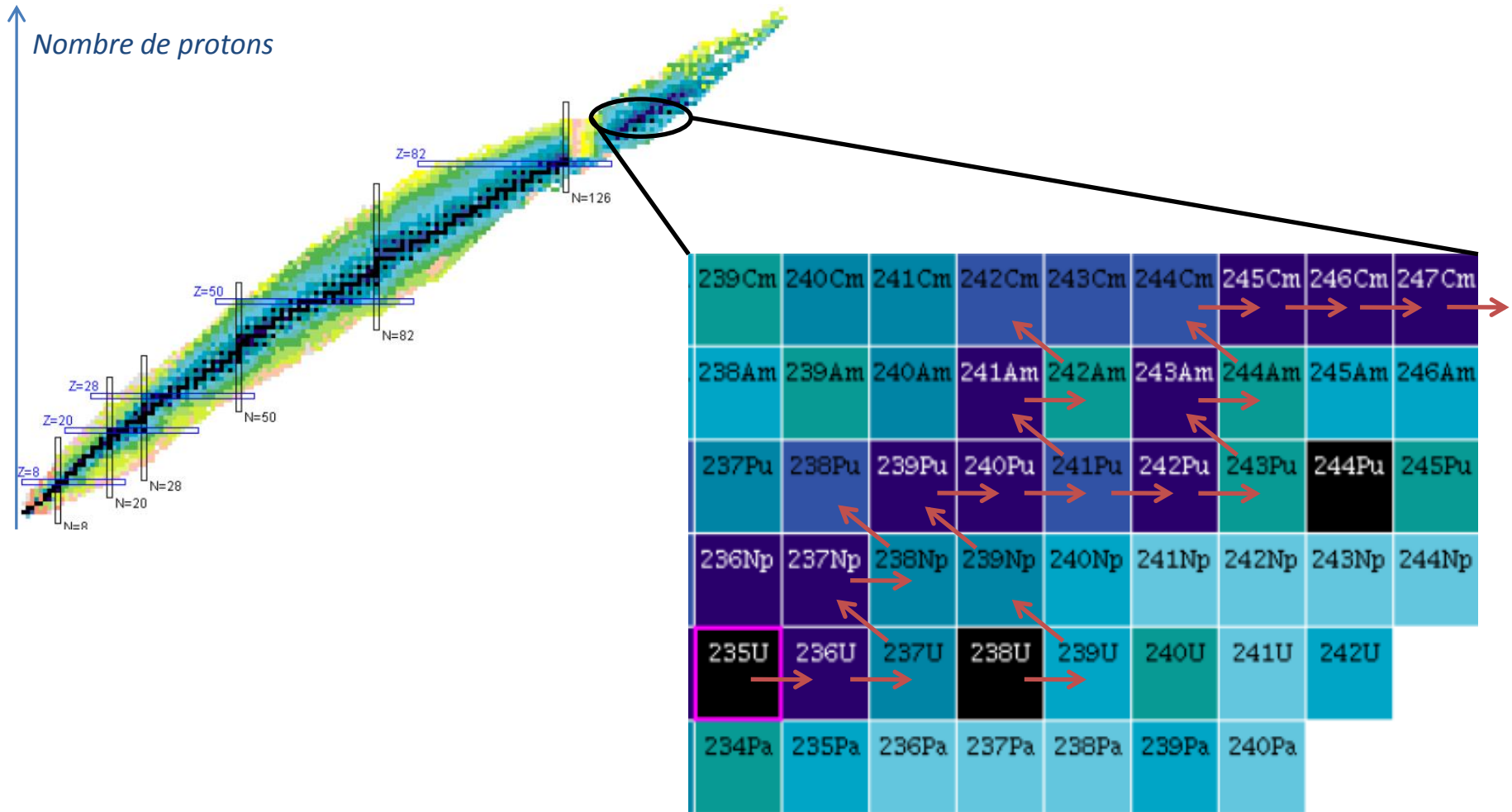
La fission



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

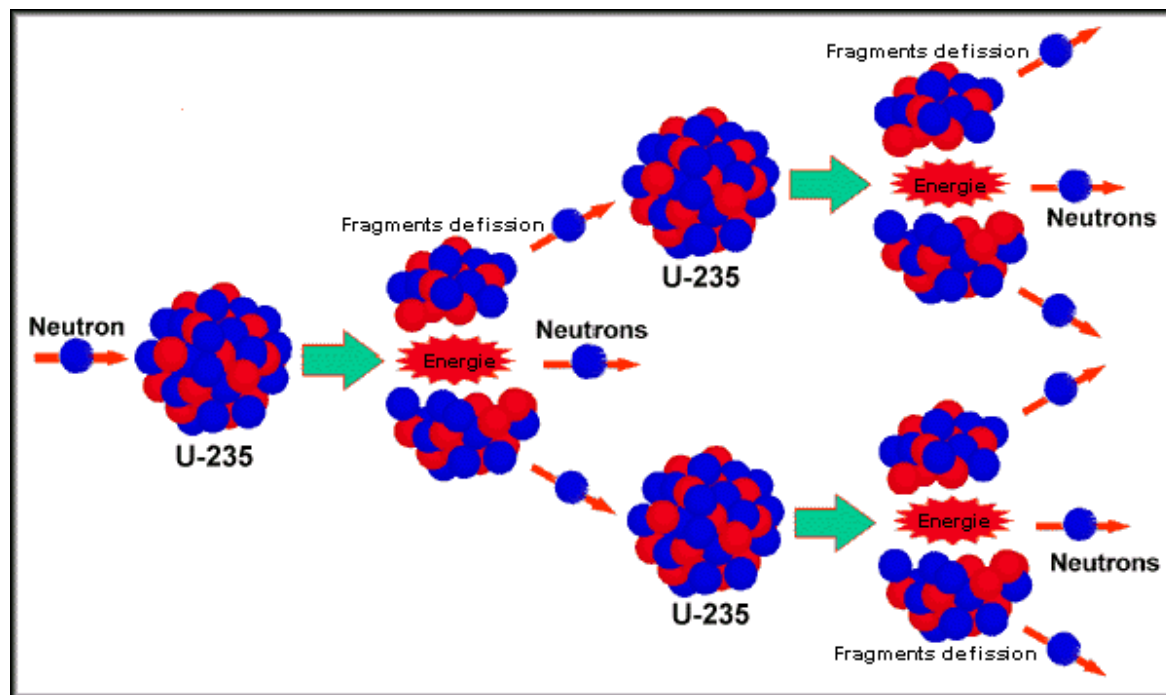


L'irradiation produit des noyaux lourds par captures neutroniques :

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

De la fission à la réaction en chaîne

Avec les neutrons émis par la fission, il est possible d'établir une réaction en chaîne



Si on injecte 1 neutron :

1^{er} génération $\rightarrow k$ neutrons

2^{ème} génération $\rightarrow k^2$ neutrons

3^{ème} génération $\rightarrow k^3$ neutrons

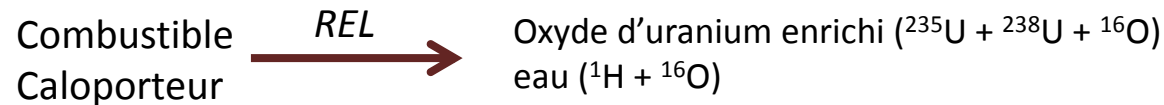
$n^{\text{ème}}$ génération $\rightarrow k^n$ neutrons

Fonctionnement d'un réacteur : principe de base

Coefficient de multiplication de neutrons $k = \frac{\text{Nombre de neutrons à la génération } i+1}{\text{Nombre de neutrons à la génération } i}$

$$= \frac{\text{Production de neutrons (par fission)}}{\text{Pertes de neutrons}} = 1 \text{ (si critique)}$$

Pour un réacteur il faut :



Production de neutrons	Disparition de neutrons
Probabilité de provoquer une fission sur ^{235}U	Probabilité d'absorption par ^{238}U
x	+
Nombre de neutrons émis par fission	Probabilité d'absorption par ^{235}U
	+
	Probabilité d'absorption par ^1H
	+
	Probabilité d'absorption par ^{16}O

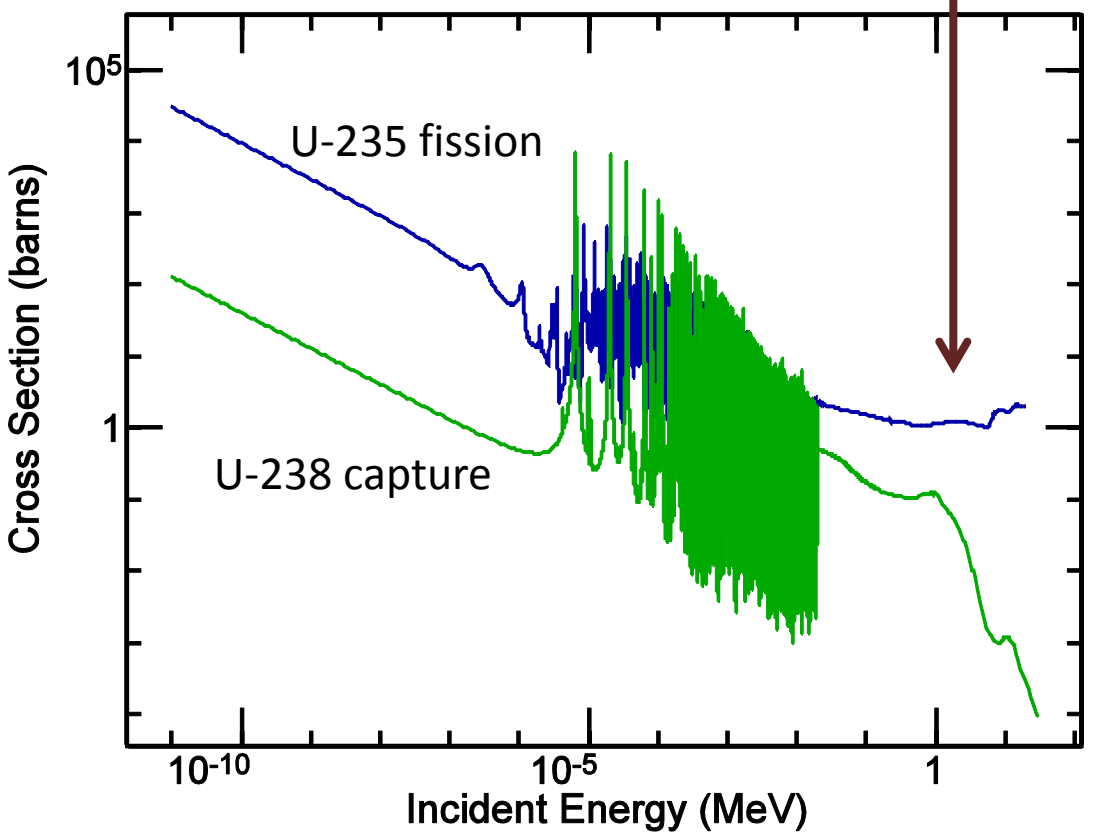
- Pendant le fonctionnement, k est constamment maintenu à 1
- La probabilité de réaction entre un noyau et un neutron est proportionnelle à
- Sa concentration
 - La section efficace de réaction

Fonctionnement d'un réacteur : principe de base

$$k = \frac{\text{Production de neutrons (par fission)}}{\text{Pertes de neutrons}} = 1 \text{ (si critique)} = \frac{N_{fissile} \sigma_{fissile}}{\sum_{\text{Noyau, Reaction}} N_i \sigma_r^i}$$

➤ Les sections efficaces dépendent de l'énergie du neutrons

Neutrons produits par fission



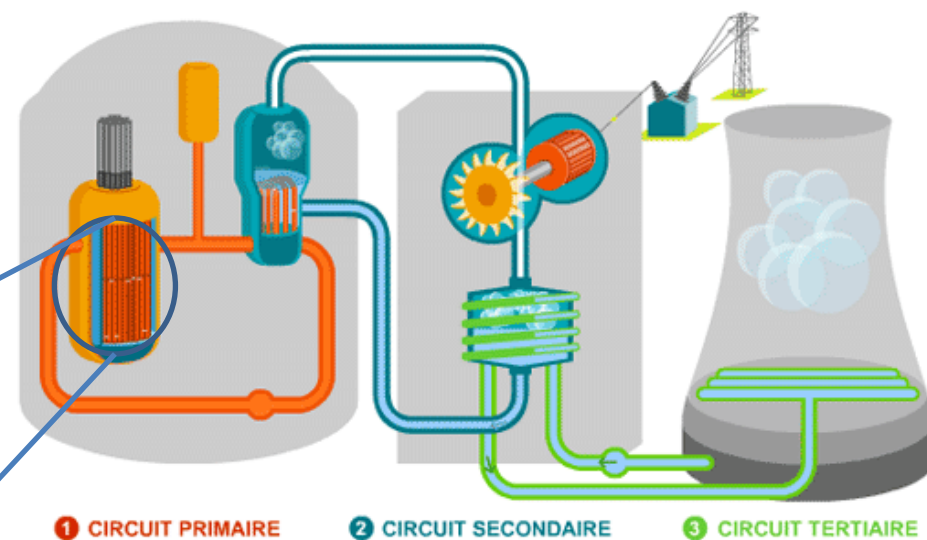
- Pour augmenter la probabilité de fission on peut :
 - Augmenter la concentration d'²³⁵U
 - Ralentir les neutrons
- Les neutrons perdent de l'énergie essentiellement par choc élastique (physique du billard)
- L'hydrogène est le noyau le plus efficace pour ralentir les neutrons ... mais il absorbe trop les neutrons pour utiliser de l'uranium naturel

$$e = \frac{[^{235}\text{U}]}{[\text{tot U}]} \sim 4\% \text{ Dans un REP}$$

Compromis entre la technologie et l'enrichissement du combustible

Présentation générale

- 435 réacteurs dans le monde en fonctionnement
- 2416 TWh produits en 2011 (276 GW en moyenne ; facteur de charge : 74%)
- 81 % d'entre eux sont des réacteurs refroidis à l'eau légère (REP et REB)



264 assemblages combustibles



Ce qu'il faut retenir

- Dans un réacteur critique, le nombre de fission est constant en fonction du temps
- Les réacteurs en exploitations sont majoritairement des réacteurs à neutrons lents (thermiques)
 - C'est le résultat d'un compromis entre le cout de l'enrichissement et le cout de la technologie
- La fission est probabiliste : dans ~10% des cas, l'uranium 235 ne fissionne pas (capture stérile)
 - Il y a production d'actinides mineurs et de plutonium pendant l'irradiation
- La fission émet deux produits de fission (PF), radioactifs

1/ Les ordres de grandeurs qui font mal

2/ Un peu de sûreté

Les effets de la radioactivité

La sûreté nucléaire ou la défense en profondeur

3/ Les déchets nucléaires

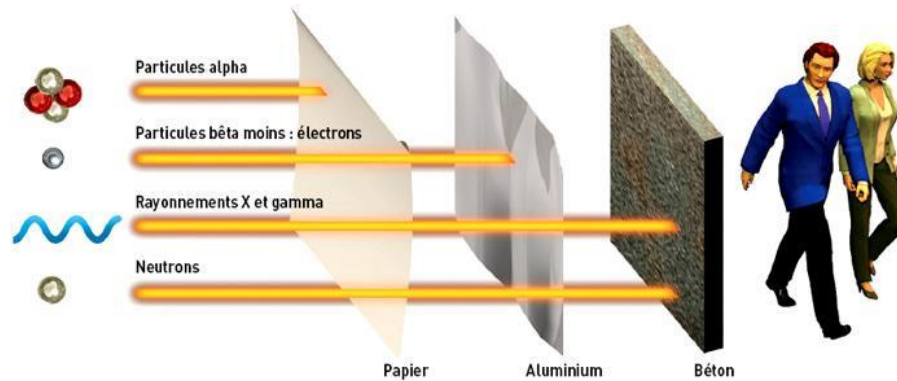
4/ Les ressources en uranium

5/ La transmutation

6/ Conclusions

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 :

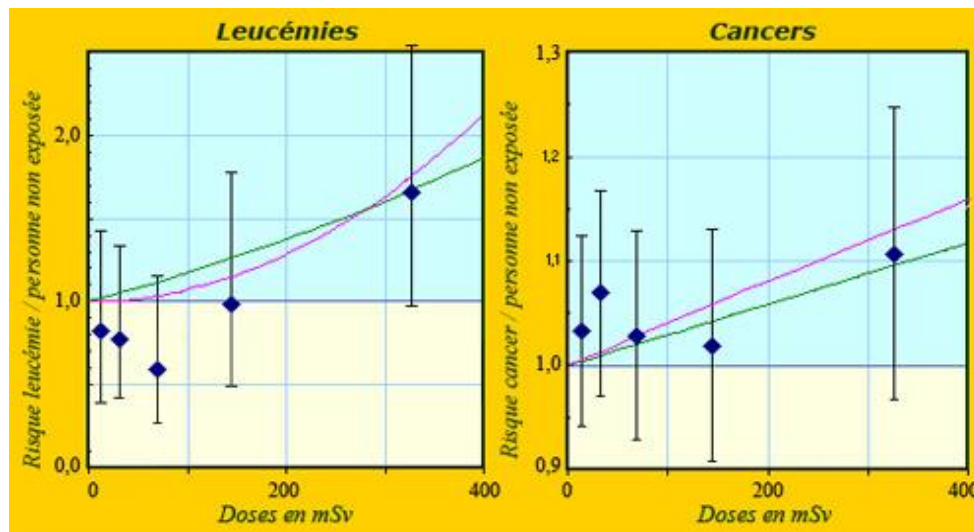
- 40 Sv : Destruction des cellules nerveuses : coma et mort
- 20 Sv : Seuil des brûlures
- 10 Sv : Nausée, vomissement : hémorragie digestive létal

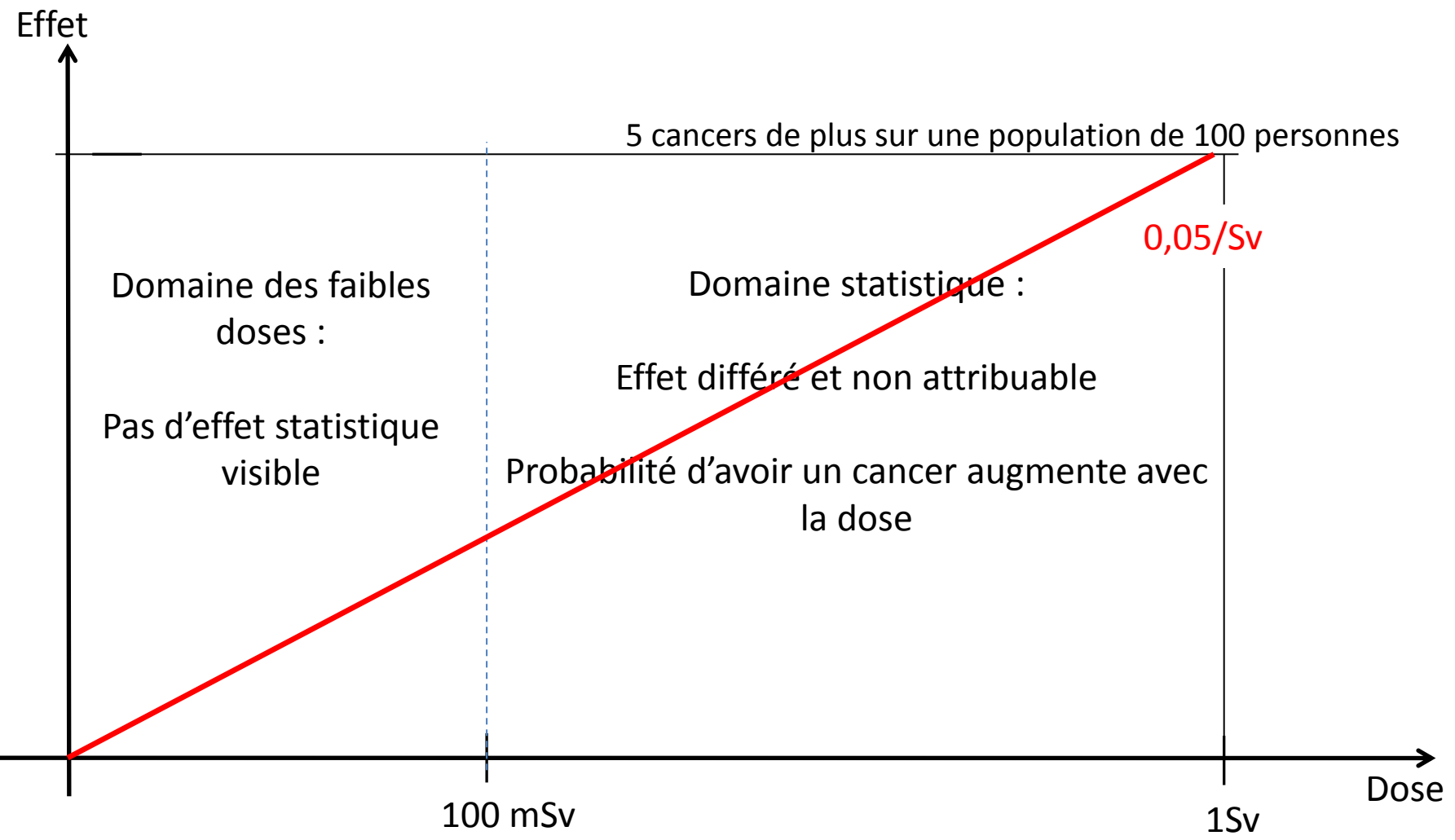
Tchernobyl > 47 morts directs en 1 mois suite à l'irradiation

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

Et un réacteur ça représente combien ?

Le combustible utilisé représente le terme source de radioactivité (à l'arrêt)

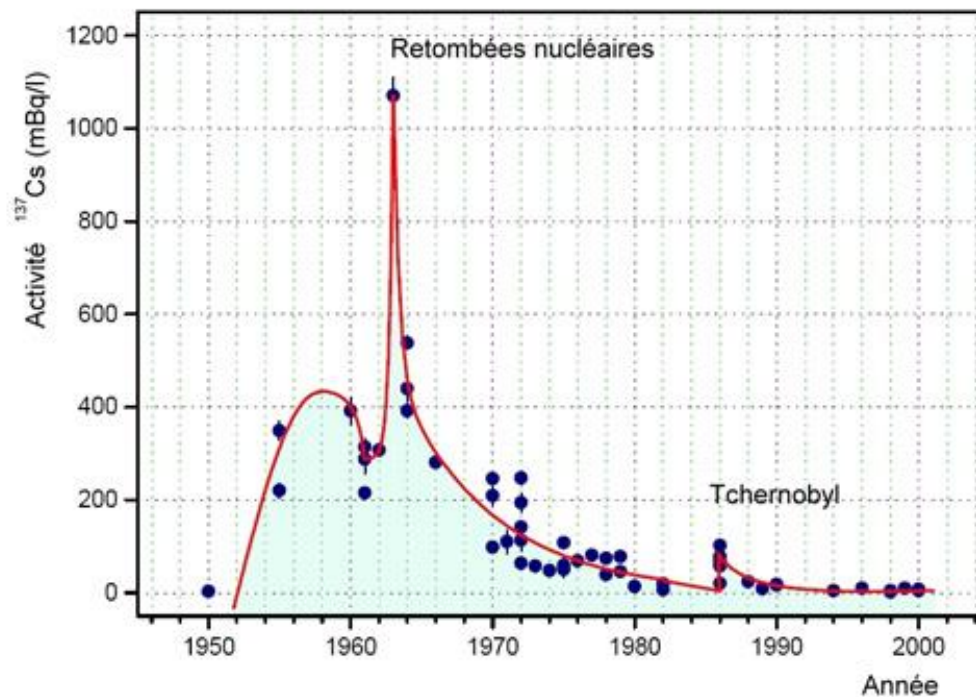
→ Plus le combustible est utilisé, plus la radiotoxicité qu'il contient est importante

→ Comparer les rejets d'une bombe atomique et d'un accident nucléaire type Tchernobyl

Hiroshima : 15 kilotonnes = $15 \cdot 10^3 \times 4,184 \text{ GJ} = 6,3 \cdot 10^{13} \text{ J}$

Réacteur de $1 \text{ GW}_e = 3 \text{ GW}_{th} \times 365 \times 86400 \times 0,8 = 7,6 \cdot 10^{16} \text{ J}$

Mais il y a eu beaucoup plus d'essai que d'accidents nucléaires



Il faut empêcher que la radioactivité se disperse dans la biosphère, Pour cela on :

- Confine (3 barrières)
- Refroidit (même à l'arrêt et surtout en cas d'accident)
- Contrôle la réactivité
- Contrôle les opérateurs, les exploitants avec des lois et des procédures stricts. *L'autorité de sûreté doit être indépendante de l'industrie*

→ On peut améliorer la sûreté en engageant les citoyens pour améliorer les procédures de sûretés

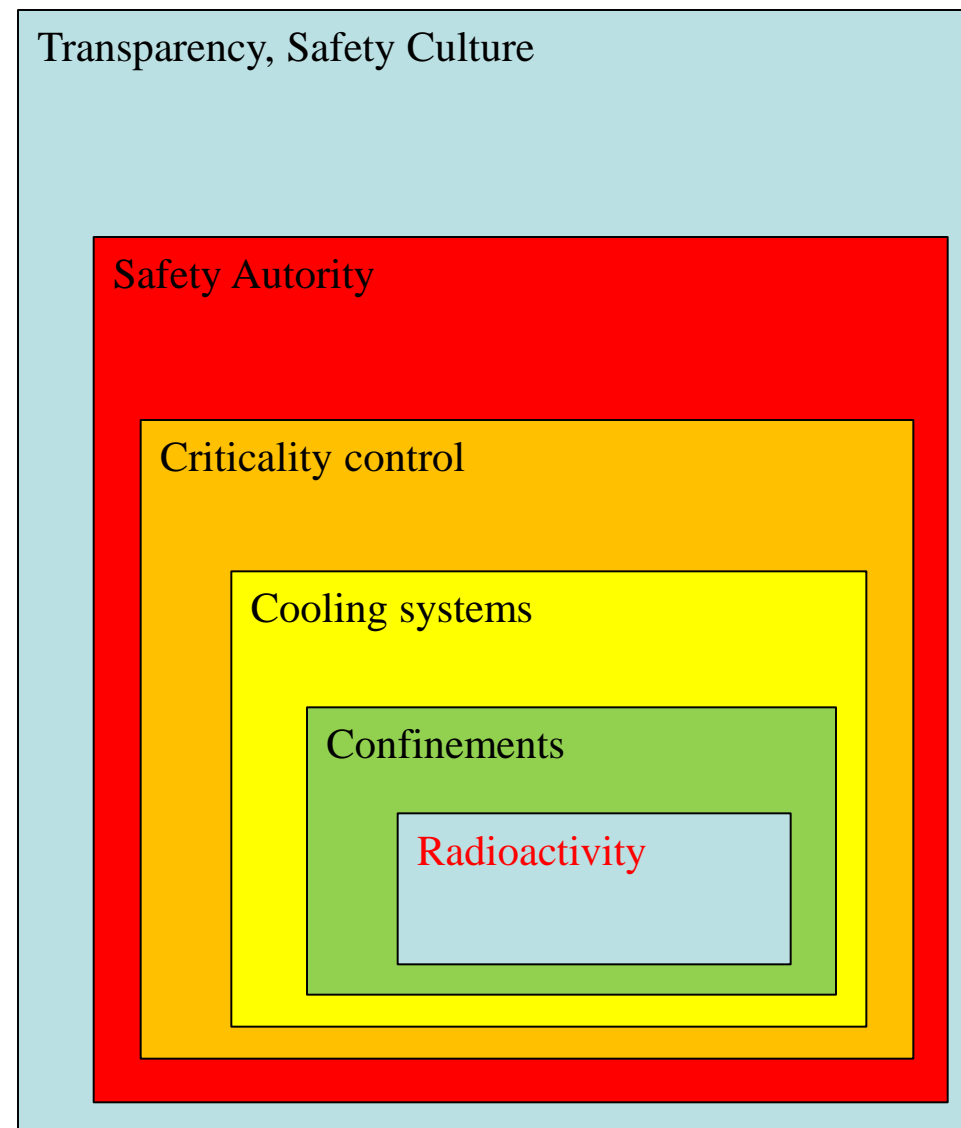
LOI no 2006-686 du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire

Création de l'ASN

Création des Commissions Locales d'Information

Article 22. II

II. – **La commission locale d'information comprend** des représentants des conseils généraux, des conseils municipaux ou des assemblées délibérantes des groupements de communes et des conseils régionaux intéressés, des membres du Parlement élus dans le département, **des représentants d'associations de protection de l'environnement**, des intérêts économiques et d'organisations syndicales de salariés représentatives et des professions médicales, ainsi que des personnalités qualifiées.



Ce qu'il faut retenir

- Il est compliqué de mesurer les effets de la radioactivité sur les populations
- L'unité qui mesure les effets sur le corps humain est le Sievert : unité empirique et réglementaire !
- La radioactivité contenue dans un réacteur est énorme ! (1000 fois plus que celle rejetée par une explosion atomique atmosphérique type Hiroshima)
- Pour s'en prévenir, une culture de sûreté est indispensable, à tous les niveaux et intégrant les populations locales !

1/ Les ordres de grandeurs qui font mal

2/ Un peu de sûreté

3/ Les déchets nucléaires

Qu'est ce qu'un déchet ?

Le procédé de retraitement

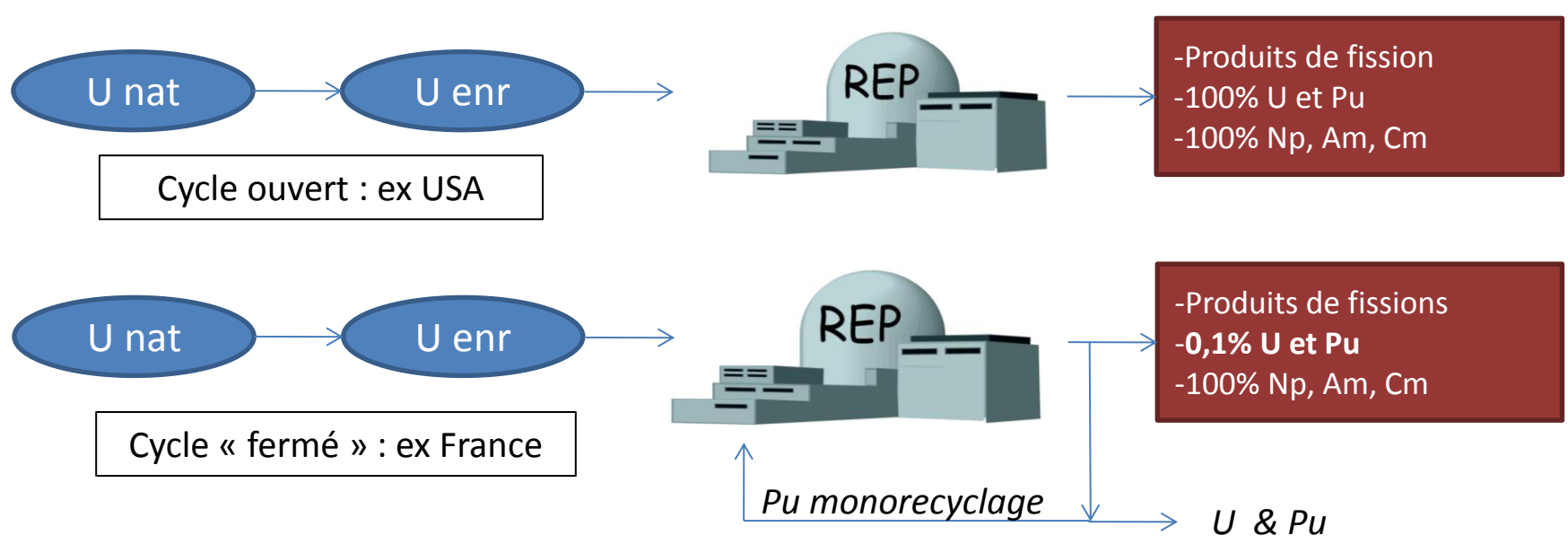
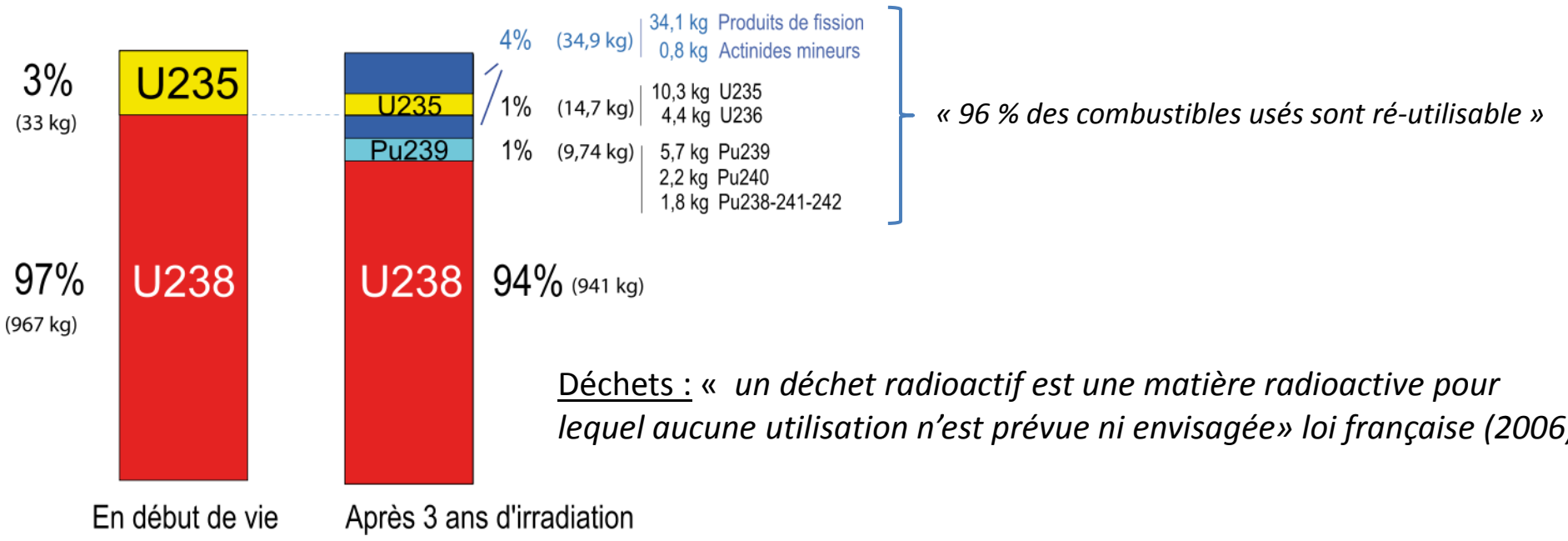
Le débat CIGEO

4/ Les ressources en uranium

5/ La transmutation

6/ Conclusions

Déchets nucléaires



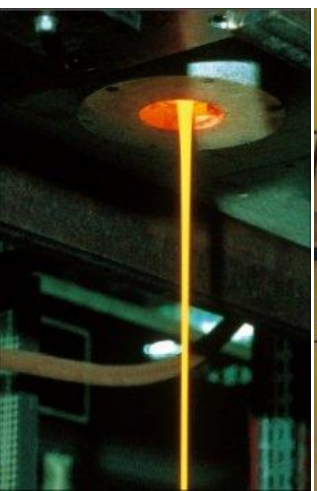
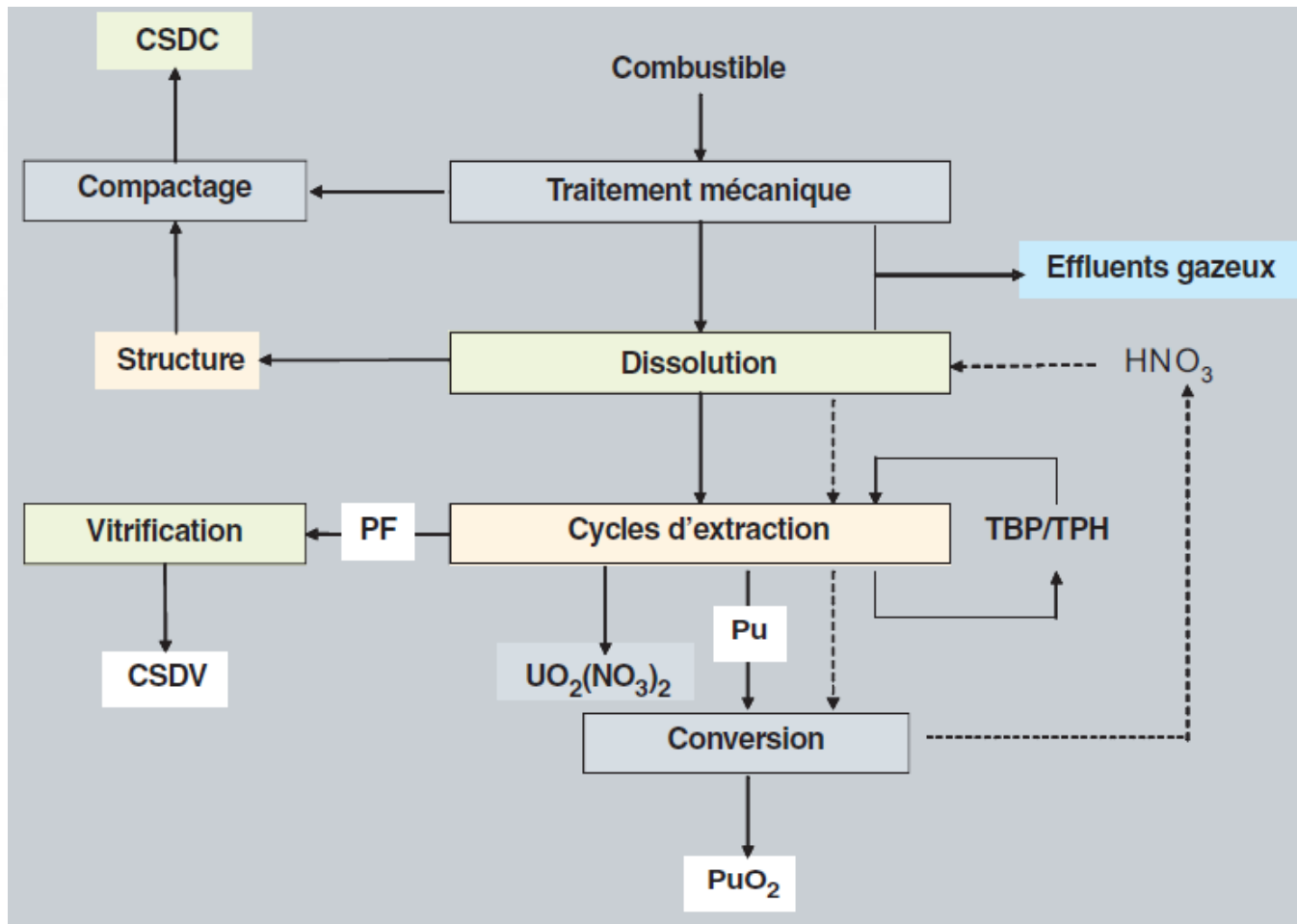


On laisse refroidir le combustible pendant 5 ans dans des piscines dans le bâtiment combustible

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



Le procédé de retraitement



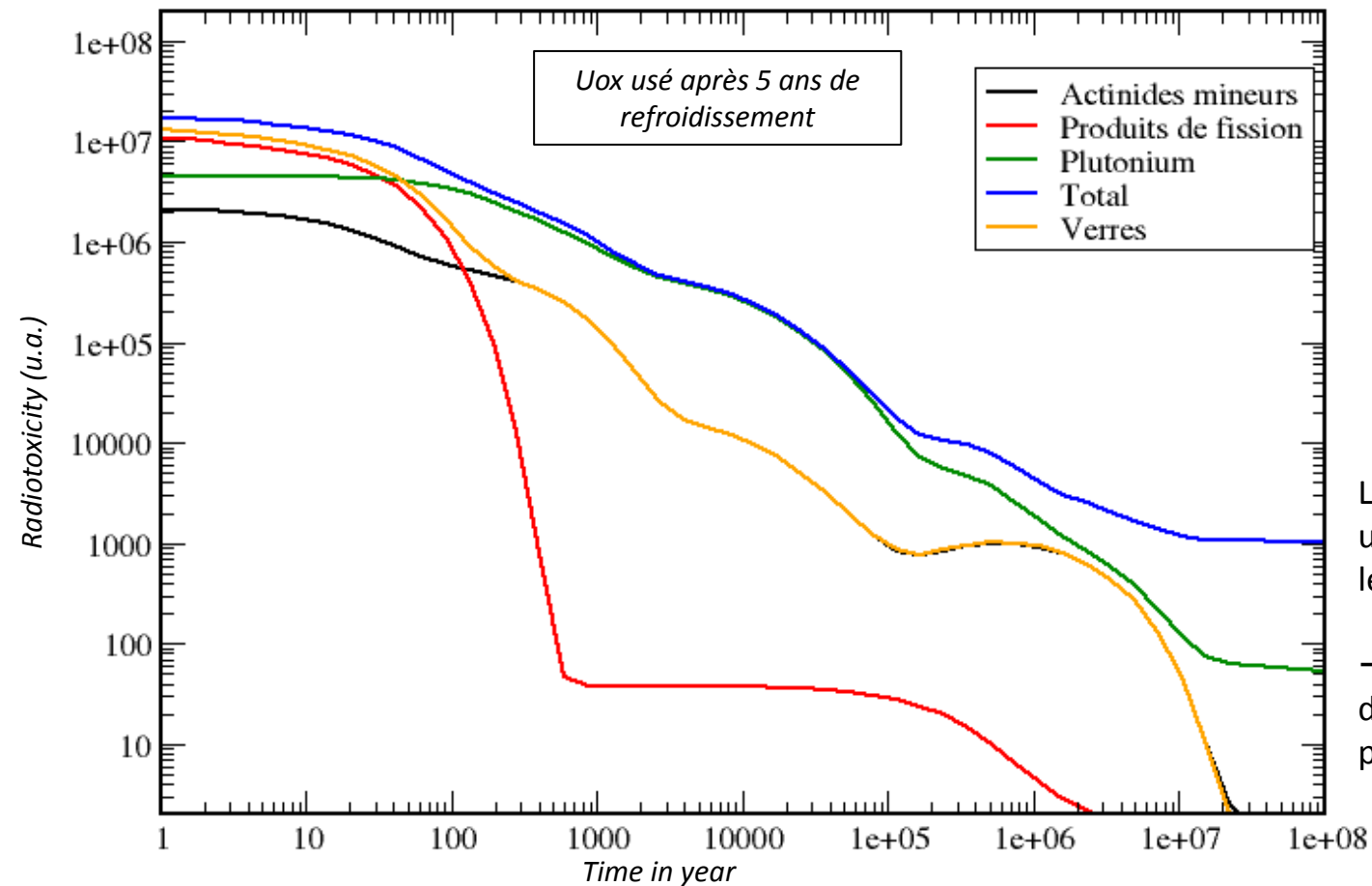
Comment qualifier les déchets nucléaires ?

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

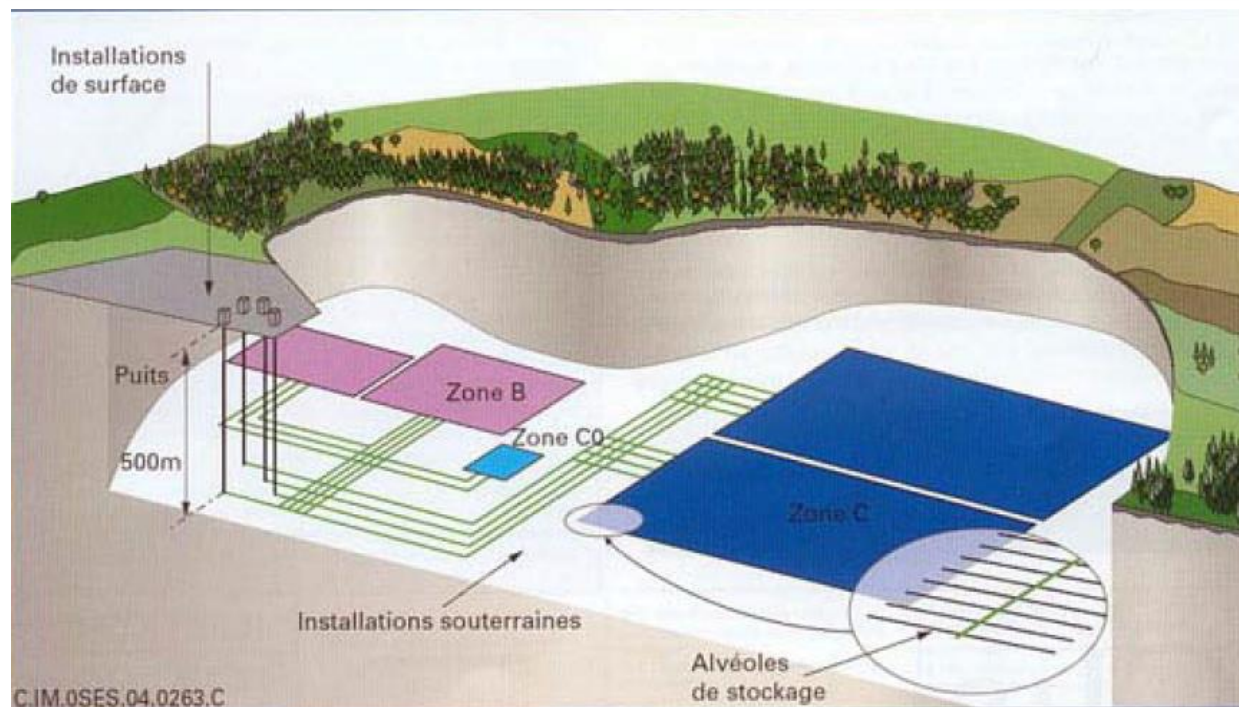
→ la radiotoxicité ne présente rien de réel mais est un bon moyen pour comparer les déchets



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

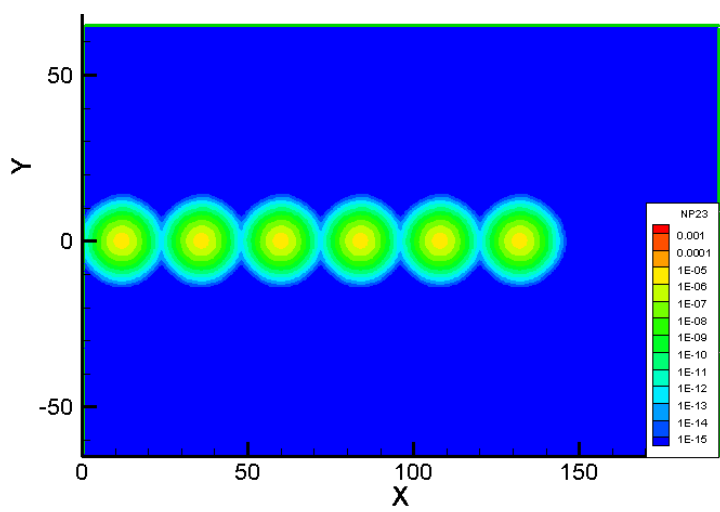


Deux types de déchets à vie longue

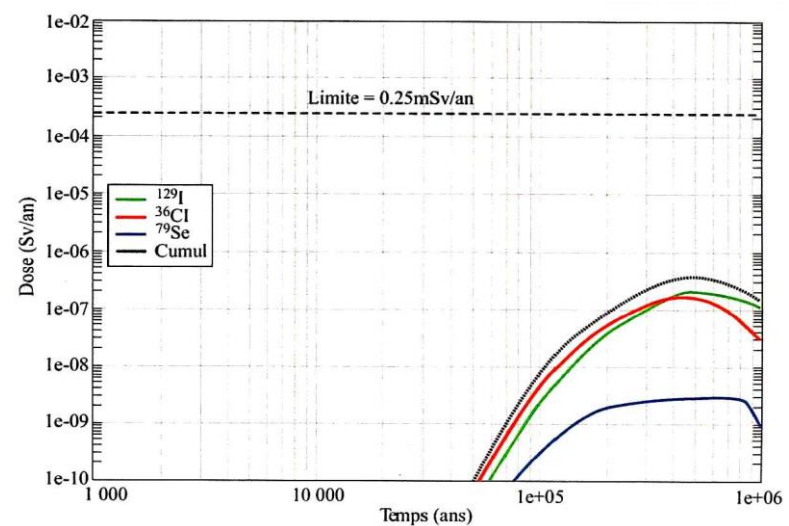
- Haute activité
- Moyenne activité



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^{er} MAI AU 1^{er} OCTOBRE 2013



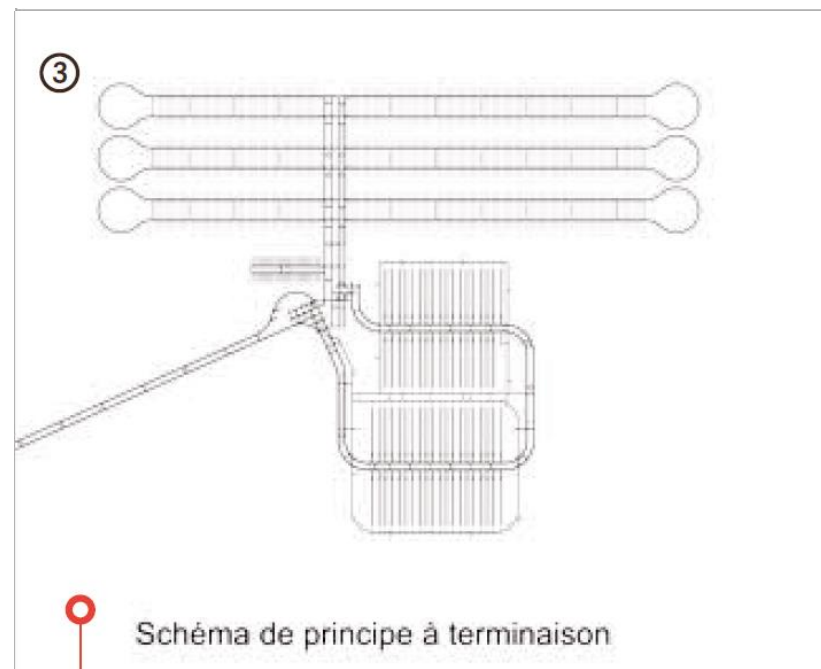
L'inventaire de CIGEO :

	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 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 !

Un retour en arrière ?

cndp

Commission particulière

du **débat public**
Gestion des
déchets radioactifs

Compte-rendu

du **débat public**
sur les **options générales**
en matière de **gestion**
des **déchets radioactifs**
de **haute activité**
et de **moyenne activité**
à **vie longue**.

septembre 2005 - janvier 2006

- La solution mise en avant par le **débat public de 2005** est **l'entreposage pérenne**
« Utiliser le temps pour construire une solution progressive »
- Elle repose sur des **rendez-vous périodiques** pour réévaluer les choix et la mise en œuvre de l'entreposage (sûreté, exploitation,...)
- 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**

Paradoxe de la « confiance de la société »

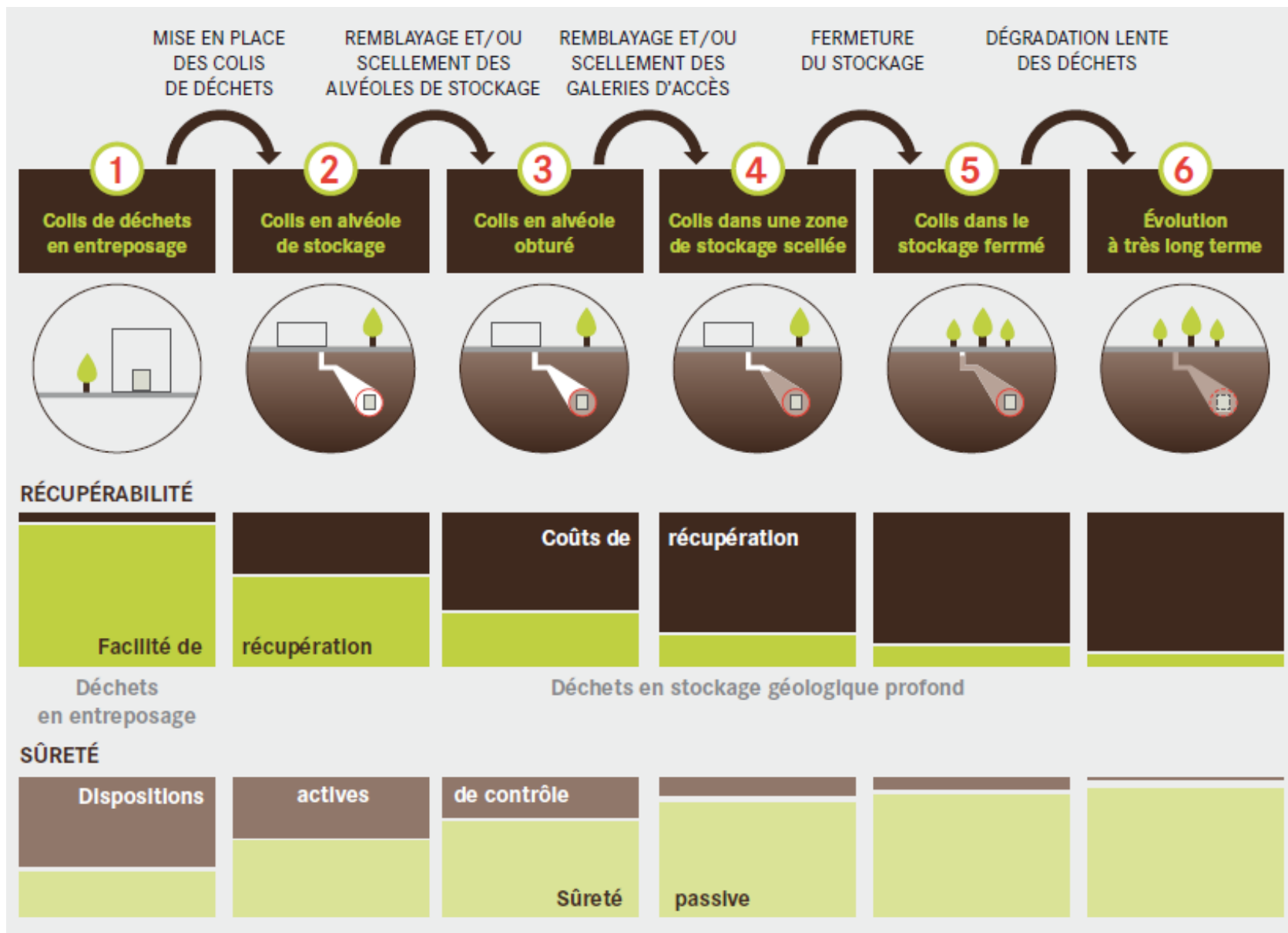
Si la société sait gérer l'inventaire dans les piscines (et les réacteurs), elle devrait savoir gérer les déchets en surface

- La réversibilité dans CIGEO :



UN STOCKAGE RÉVERSIBLE, C'EST LA POSSIBILITÉ DE REVENIR SUR LES DÉCISIONS PRISES, DE MODIFIER LE PLANNING DE FERMETURE DU STOCKAGE JUSQU'À SA FERMETURE DÉFINITIVE ET DE RETIRER DES COLIS SI BESOIN.

La réversibilité dans le stockage



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 ?

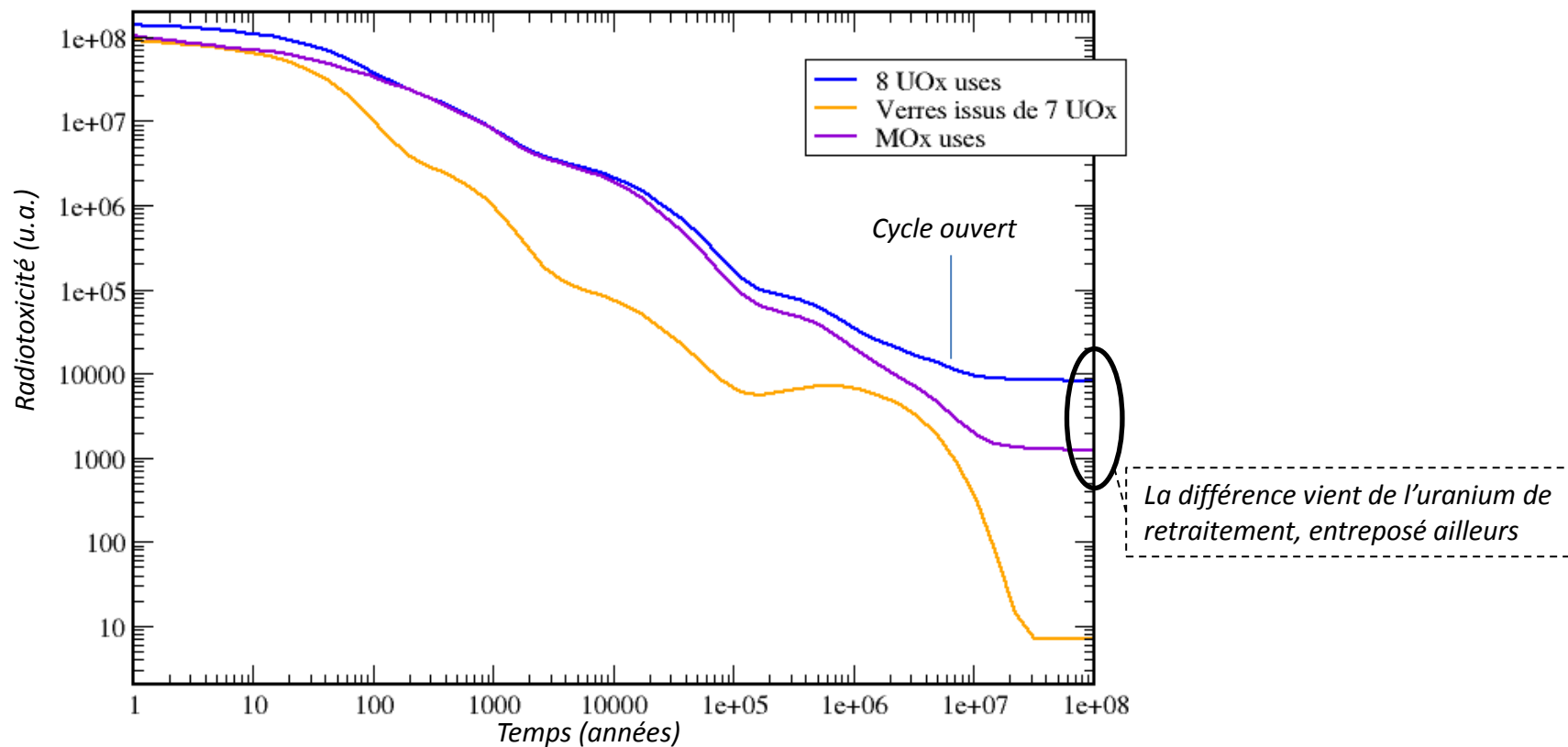
Le plutonium peut être utilisé comme matière fissile pour remplacer l'uranium 235.

→ 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 quantité de déchets dépend de leur définition
 - Suivant le statut du plutonium, c'est le déchet majoritaire ou une matière valorisable

- L'intérêt du Mox n'est pas de diminuer la radiotoxicité mais de concentrer le plutonium pour une utilisation ultérieure

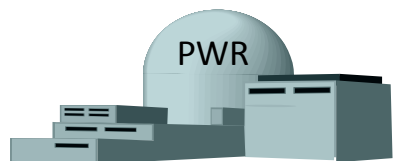
- Le stockage géologique profond est la voie de référence.
 - En France, le centre CIGEO qui est à l'étude concerne l'inventaire engagé !

1/ Les ordres de grandeurs qui font mal

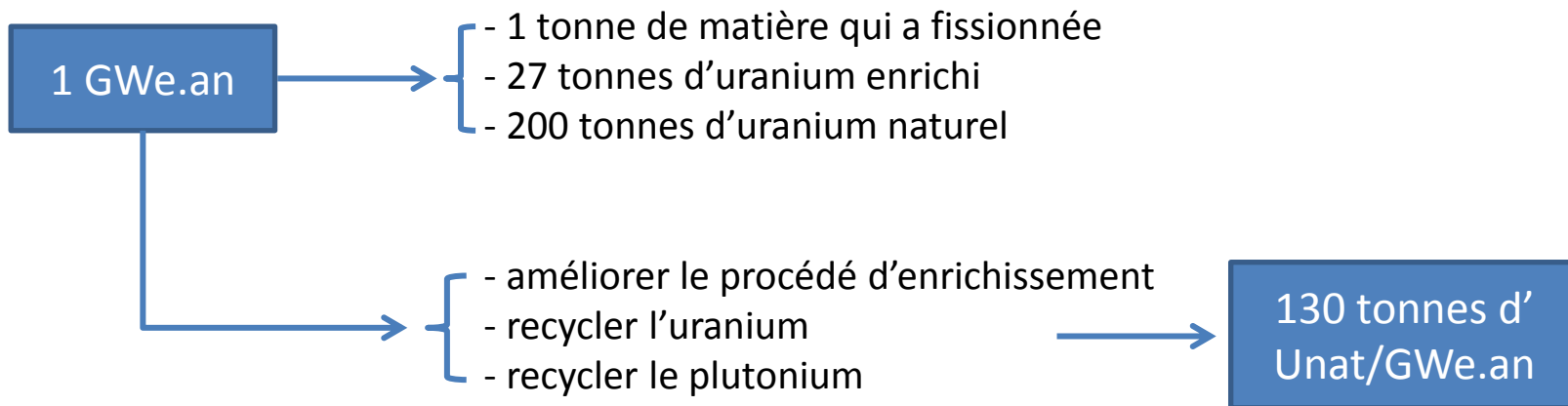
2/ Un peu de sûreté

3/ Les déchets nucléaires

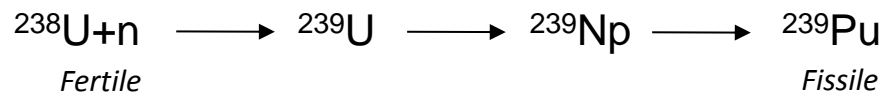
...LE RESTE DEMAIN...



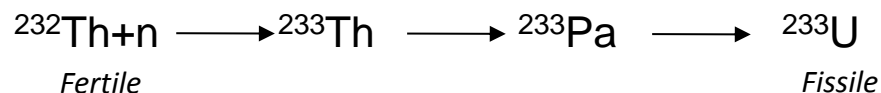
Basé sur l'utilisation de l' ^{235}U (0,7% de l'uranium naturel)



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

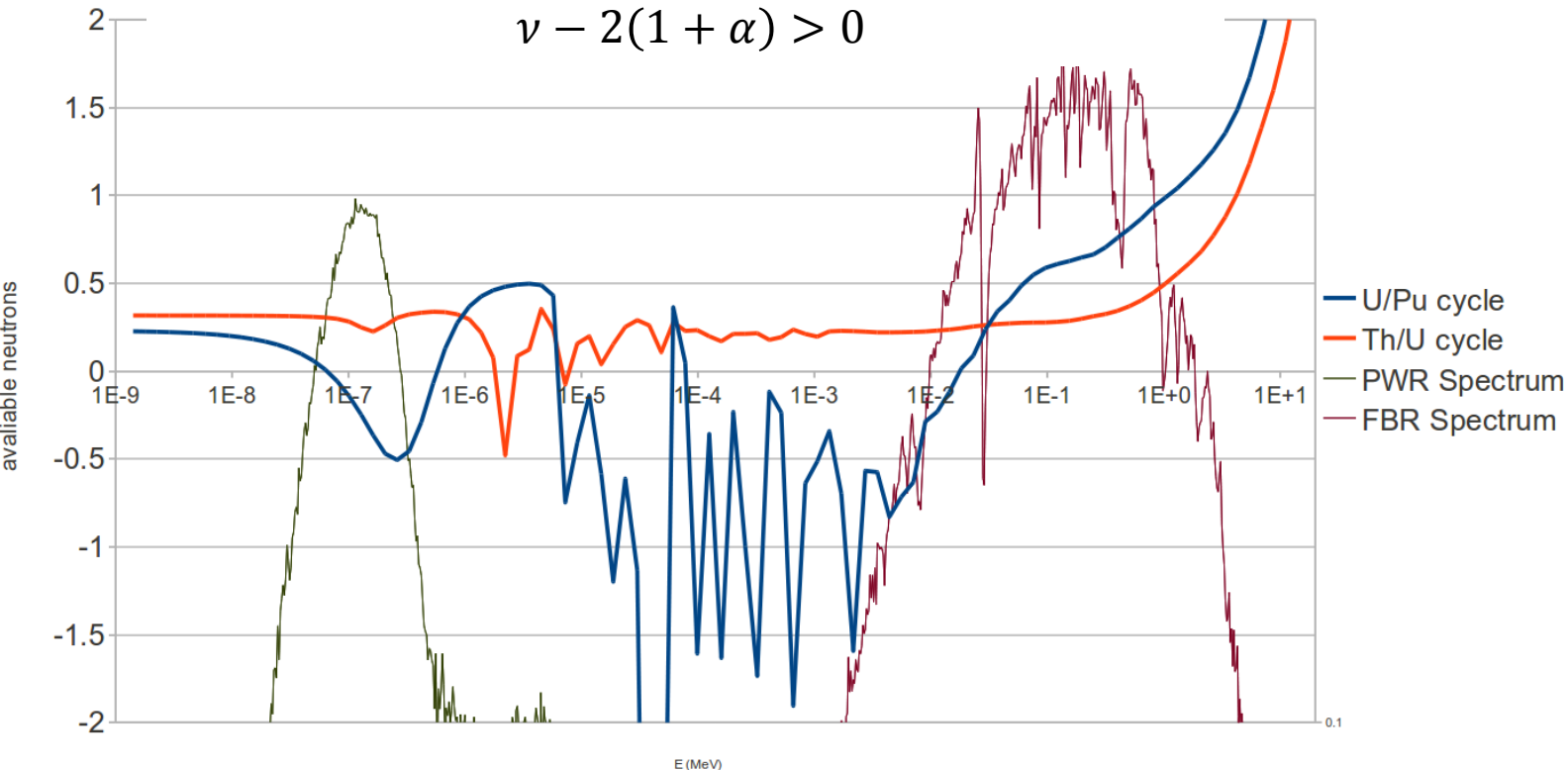
$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$ est le nombre de neutron
capturé pour une fission

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

Il faut produire $1 + \alpha$ noyau fissile

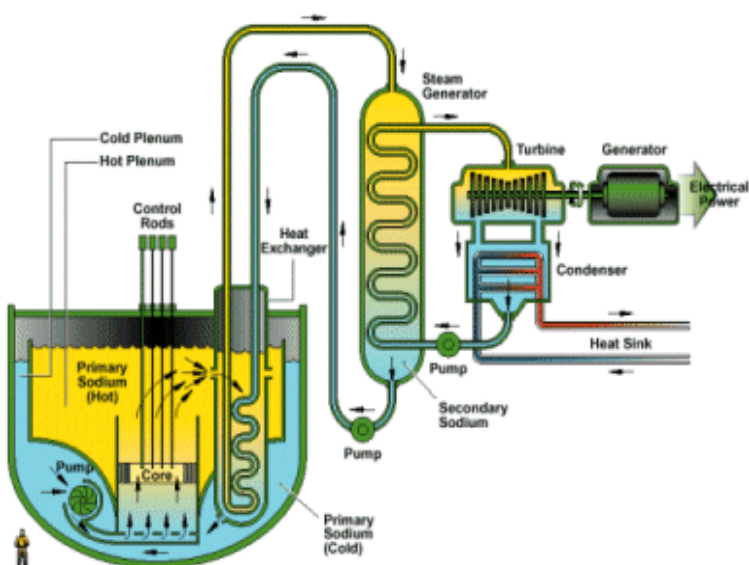
Pour que la régénération soit possible il faut que :

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



Réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium

L'exemple de superphénix



➤ Refroidissement : Sodium liquide

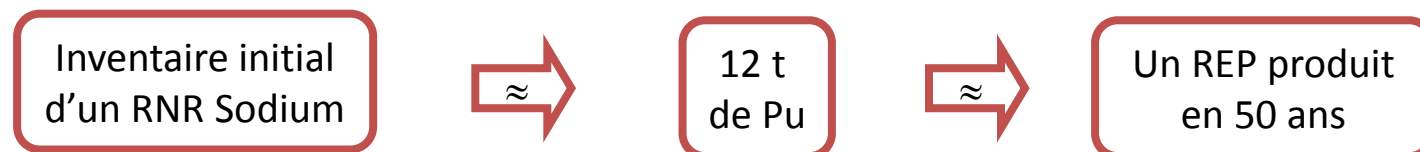
- Peu cher
- Pression atmosphérique
- Bon retour sur expérience au niveau industriel

➤ 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

- 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
- Si le **nucléaire se développe**, le **plutonium** est donc une matière fissile très **précieuse**, car les RNR U/Pu ont besoin de beaucoup de plutonium



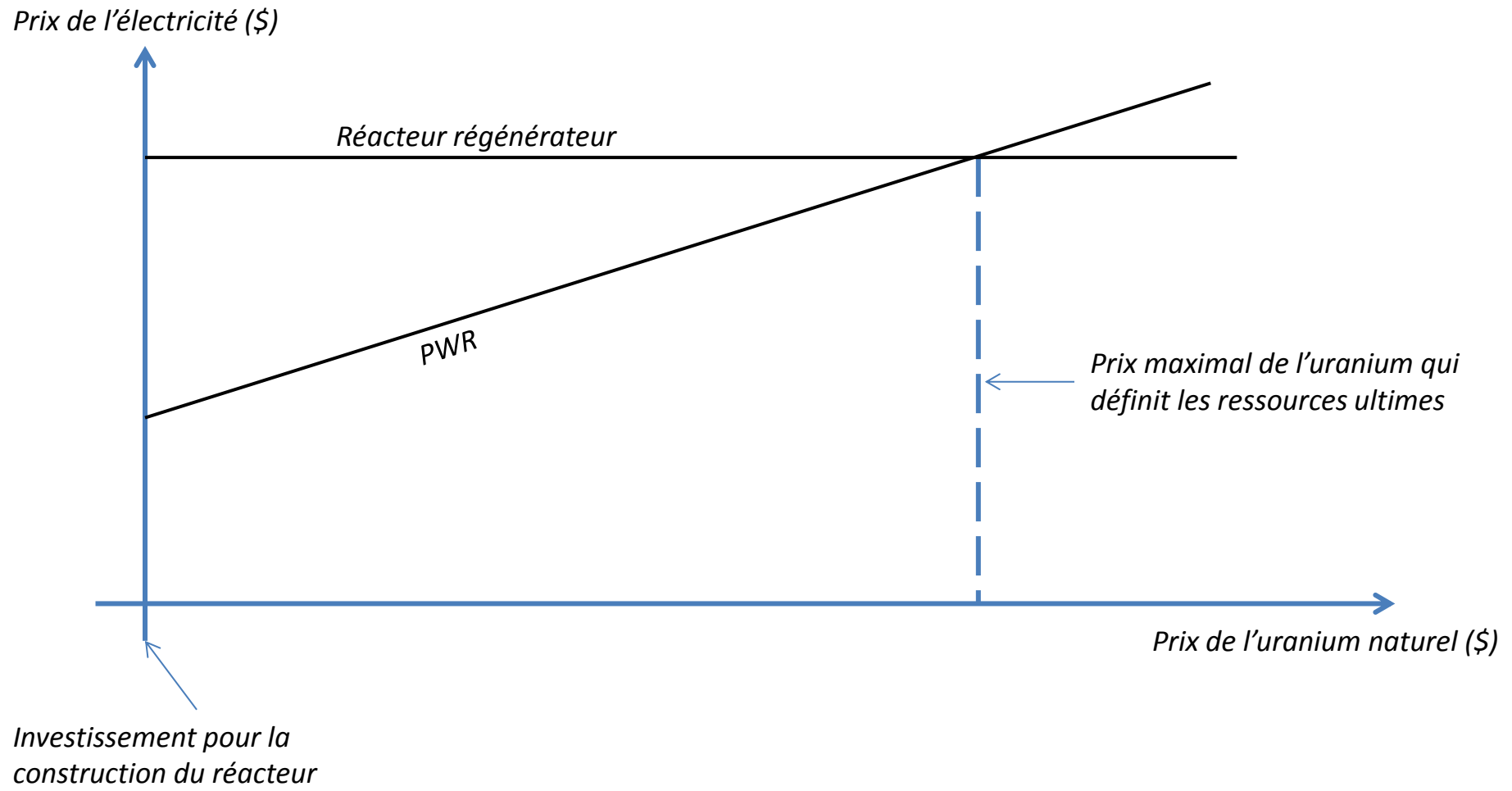
Cas Français (parc de 60 GWe de RNR-Na) :
scénarios CEA-EDF ≈ 1000 tonnes de Pu

La situation en 2012 :
300 tonnes de Pu «disponible» soit 30% seulement de l'inventaire d'un parc RNR

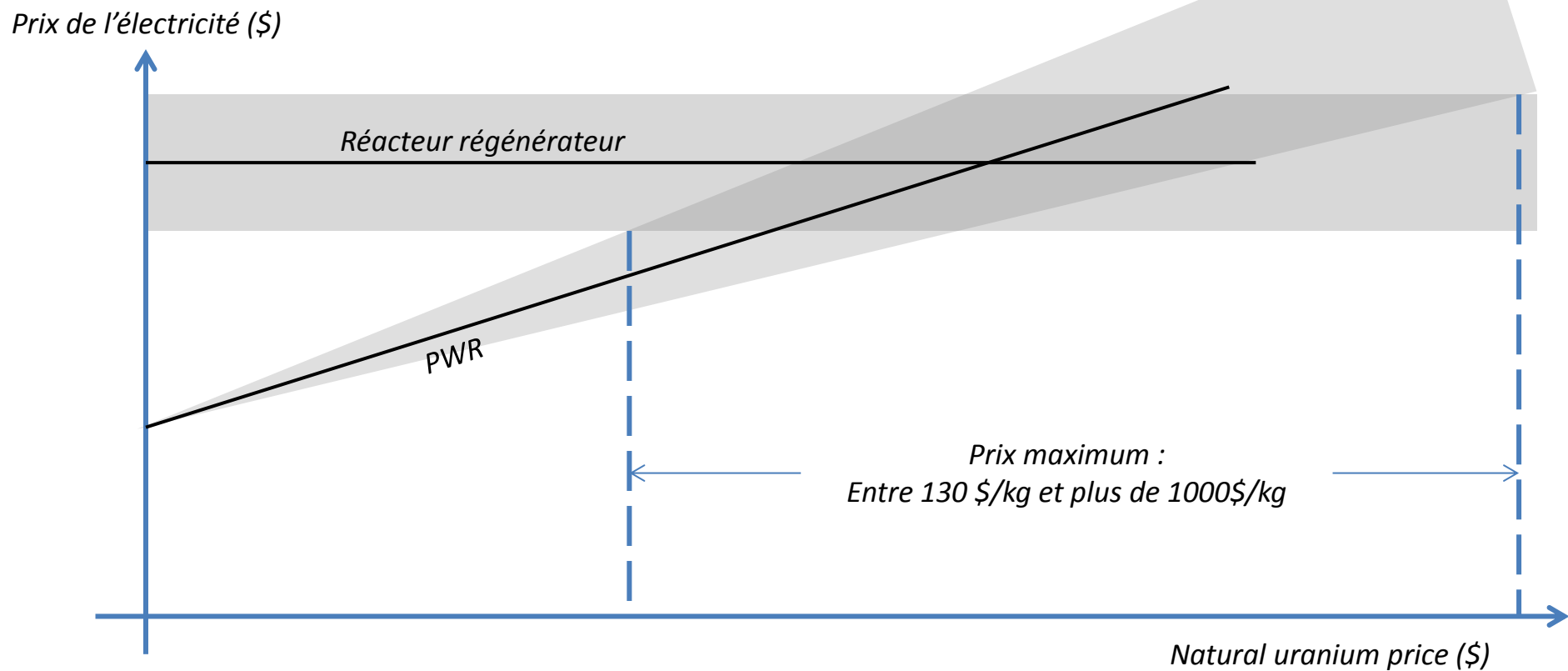
Si on a besoin rapidement des RNR (avant 2100), il faut économiser le plutonium

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

Intérêt économique d'un changement de technologie



Et avec les barres d'erreurs



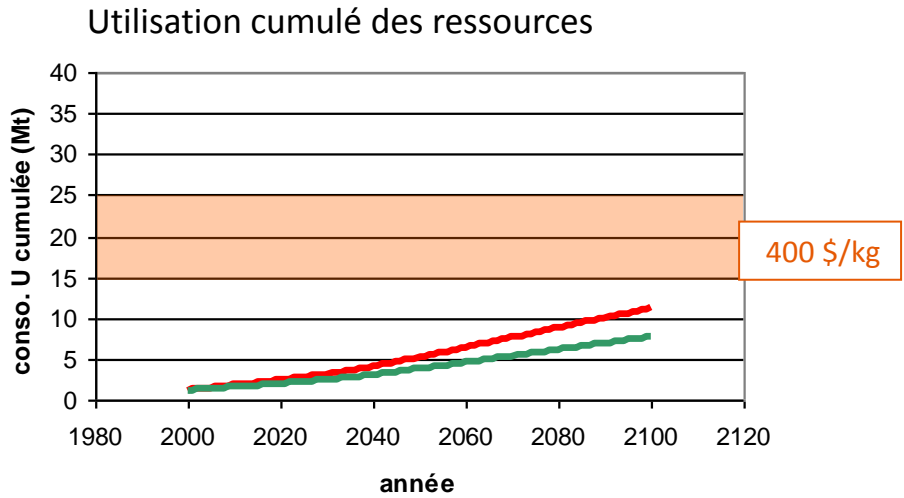
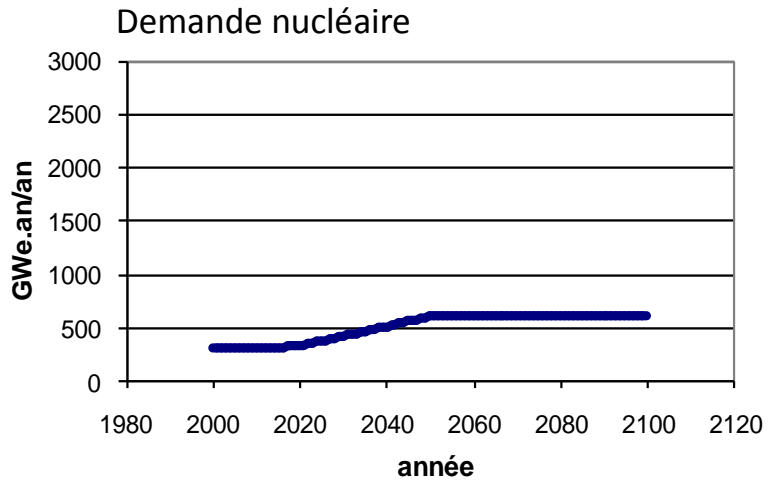
Aujourd'hui : 285 GWe (équivalent pleine puissance)
60 000 tonnes d'uranium naturel consommé par an

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
	AIEA	16
Ressources ultimes estimées		
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 201?
 - Production de 10 900 t/an



— 200t/(GWe.an)
 — 130t/(GWe.an)

Un parc mix entre réacteur régénérateur et réacteur à eau !

- Les tensions sur l'uranium seront certainement induites par les incapacités à l'extraire du sous-sol !
- Etudes technico-économiques faites avec POLES (Prospectives Outlook on Long Term Energy Systems)
On met en place une « peur de manquer » dans les scénarios

+50 % sur le cout des premiers réacteurs

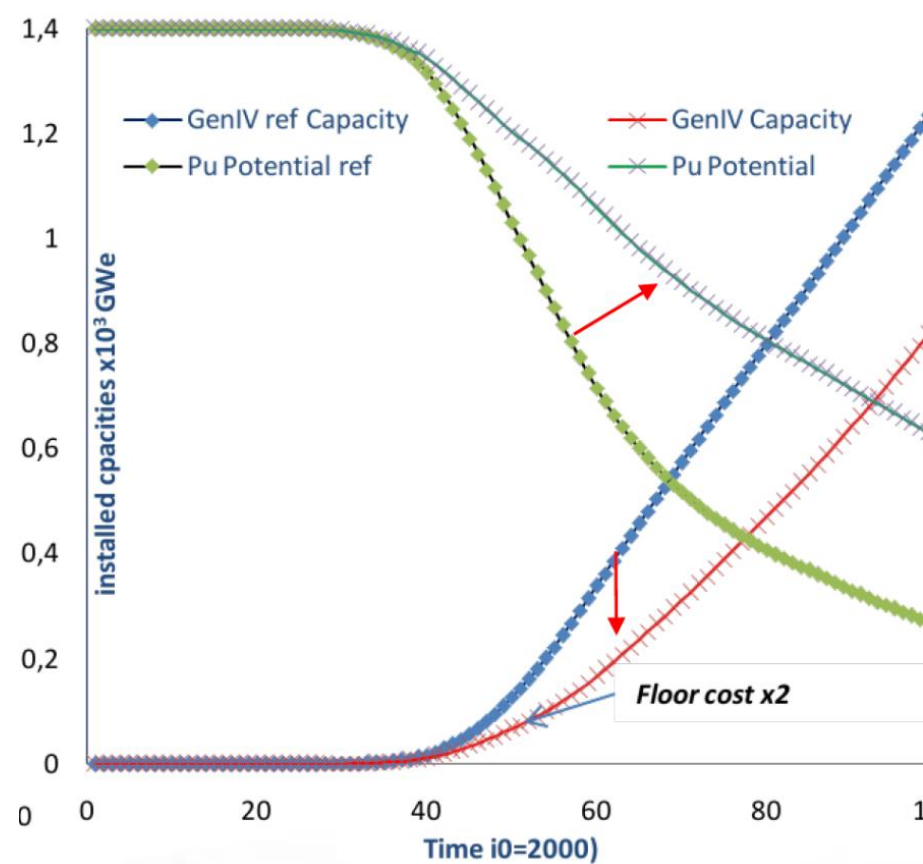
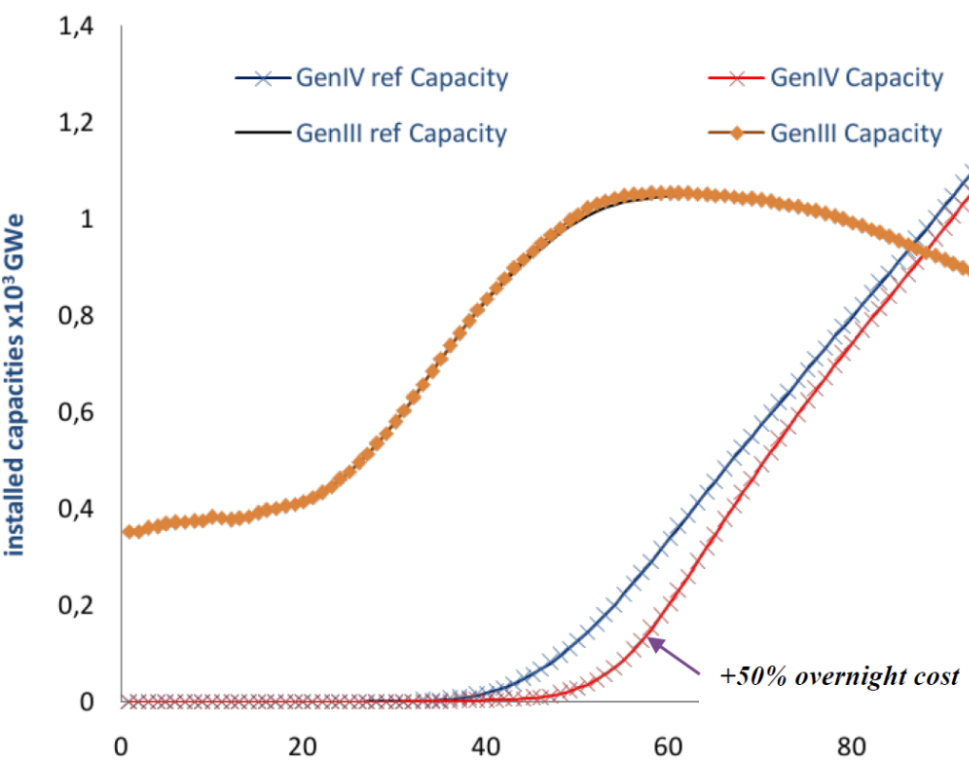
(FOAK = First Of A Kind)

- **Retard** du démarrage des GEN IV mais déploiement équivalent à long terme
- **PAS d'impact** sur le déploiement des GEN III

+100 % sur le cout de long terme des GEN IV

(prix plancher)

- **Grosse réduction** du déploiement des GEN IV
- **PAS d'impact** sur le déploiement des GEN III



Source : A. Bidaud (projet PEPITTE)

Ce qu'il faut retenir

- Le plutonium est une matière valorisable dans les réacteurs à neutrons rapides
 - 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

1/ Les ordres de grandeurs qui font mal

2/ Les déchets nucléaires

3/ Les ressources en uranium naturel

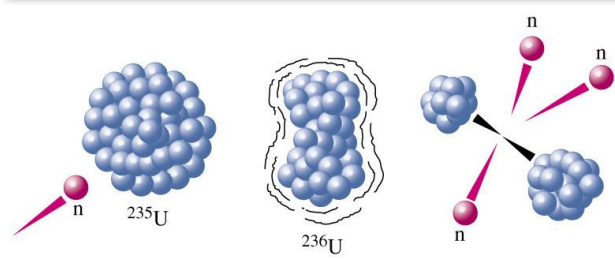
...LE RESTE DEMAIN...

Maitriser l'énergie de l'atome : Défis et enjeux - 2

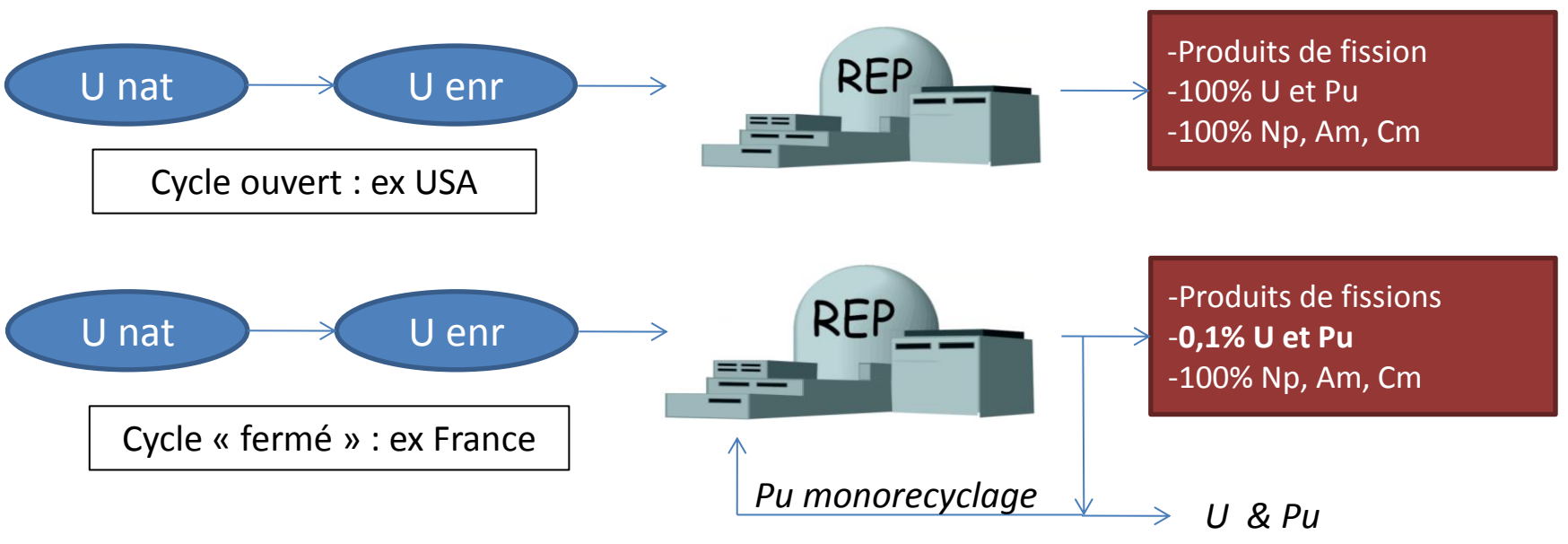
Rencontre des deux infinis
15 - 25 juillet 2014

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

Un rappel d'hier :



- L'énergie contenue dans les noyaux est colossale
 - La fission nucléaire est une énergie extrêmement concentrée
 - La radioactivité est dangereuse : il faut gérer les déchets à très long terme



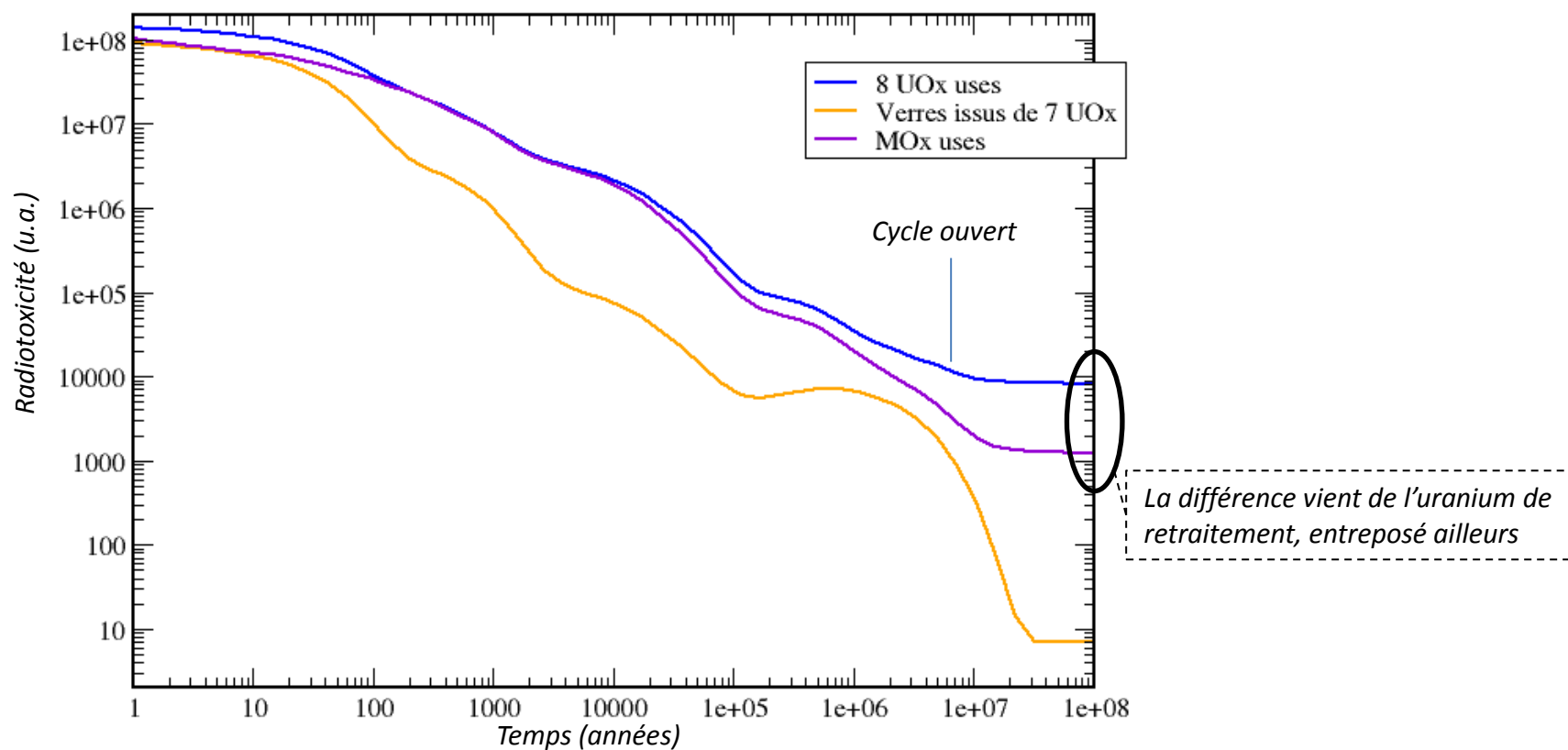
- La définition des déchets conditionnent le débat :
 - Aux USA, 30 tonnes de « déchets » par an et par réacteur
 - En France, 40 kg de « déchets » par an et par réacteur
- Suivant la stratégie, le Pu est LE déchet (ultra majoritaire) ou une matière valorisable

On enfonce le clou !

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



➤ 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

1/ Les ordres de grandeurs qui font mal

2/ Un peu de sûreté

3/ Les déchets nucléaires

4/ Les ressources en uranium naturel

La valorisation du plutonium

Compétition GENIII-GENIV

5/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

Qu'est ce que c'est ?

Deux stratégies

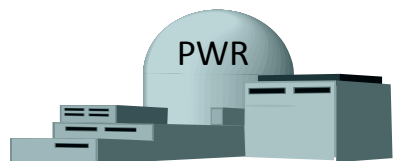
Un choix futur fortement impacté par les décisions d'aujourd'hui

6/ Conclusions : quel nucléaire pour quel futur ?

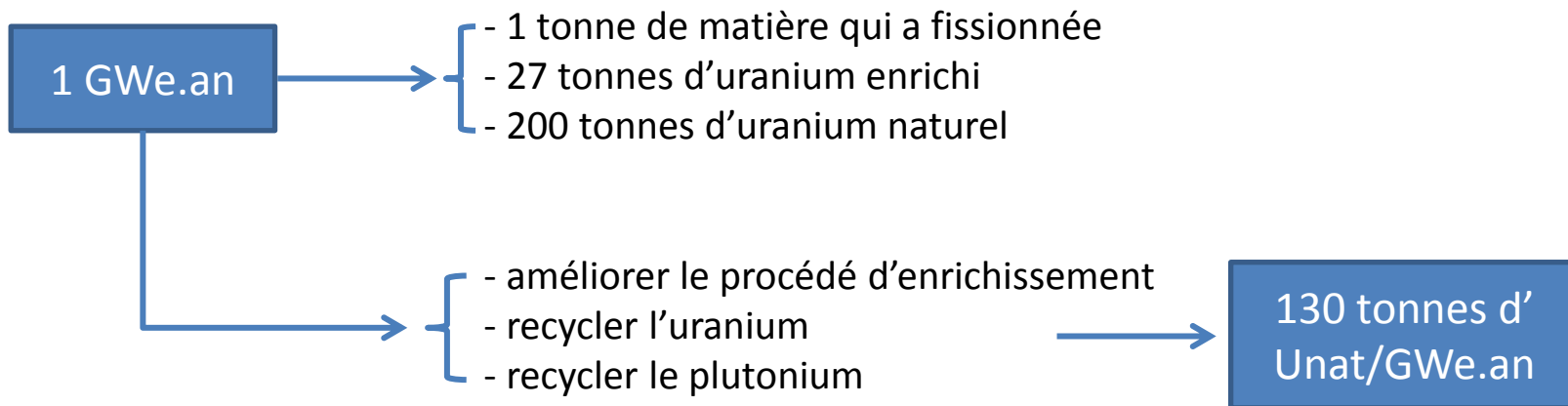
L'importance des scénarios pour les décisions

Les projets de réacteurs européens

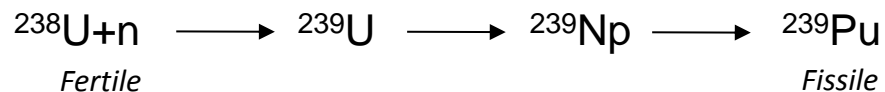
Une problématique qui dépend de la futur demande



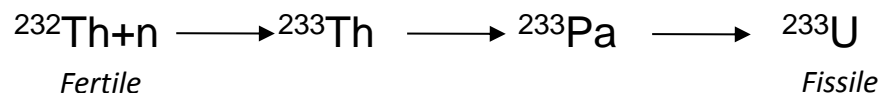
Basé sur l'utilisation de l' ^{235}U (0,7% de l'uranium naturel)



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

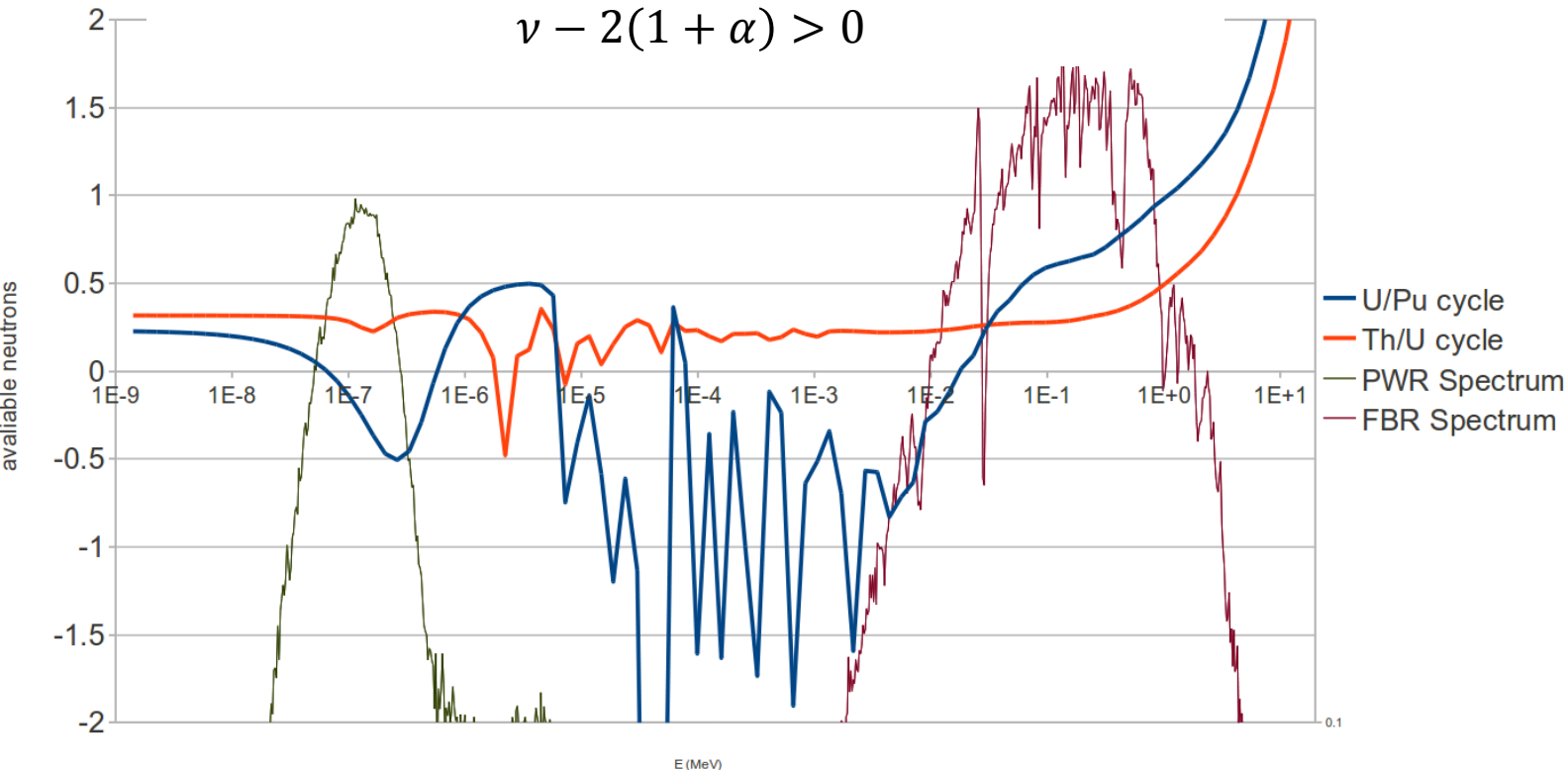
$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$ est le nombre de neutron
capturé pour une fission

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

Il faut produire $1 + \alpha$ noyau fissile

Pour que la régénération soit possible il faut que :

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



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

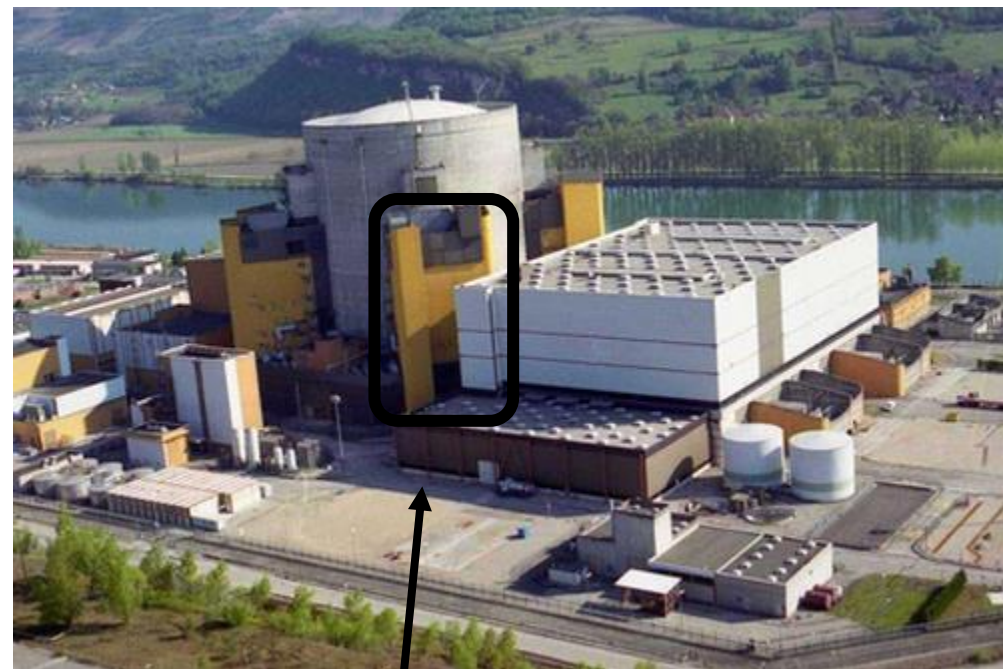
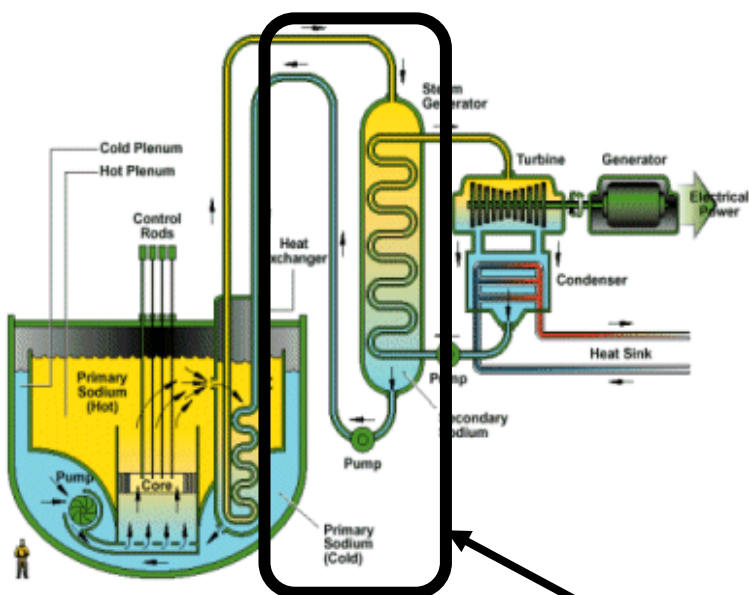
- SuperPhénix (1985 – 1997)

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

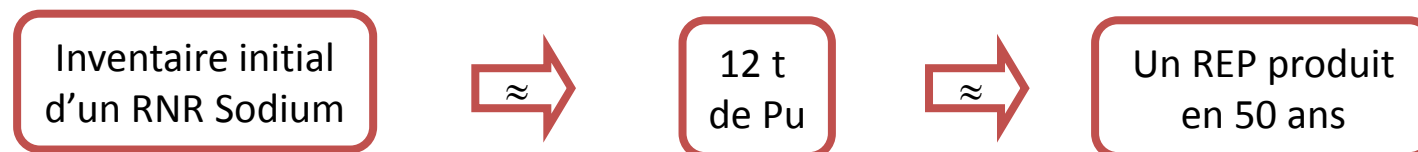
➤ Mais le sodium n'est pas stable avec l'air ni l'eau

- 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

- 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
- Si le **nucléaire se développe**, le **plutonium** est donc une matière fissile très **précieuse**, car les RNR U/Pu ont besoin de beaucoup de plutonium



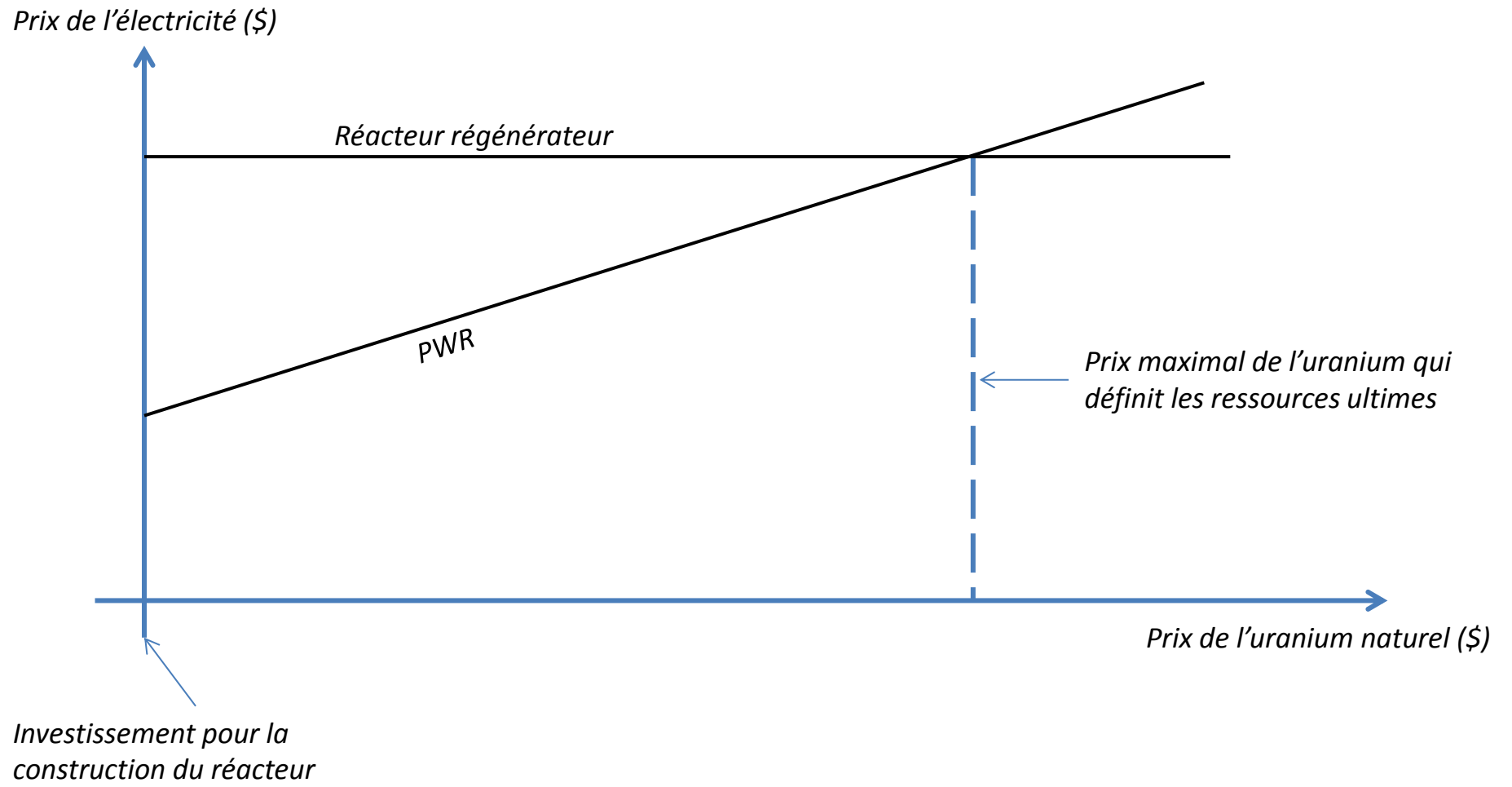
Cas Français (parc de 60 GWe de RNR-Na) :
scénarios CEA-EDF ≈ 1000 tonnes de Pu

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

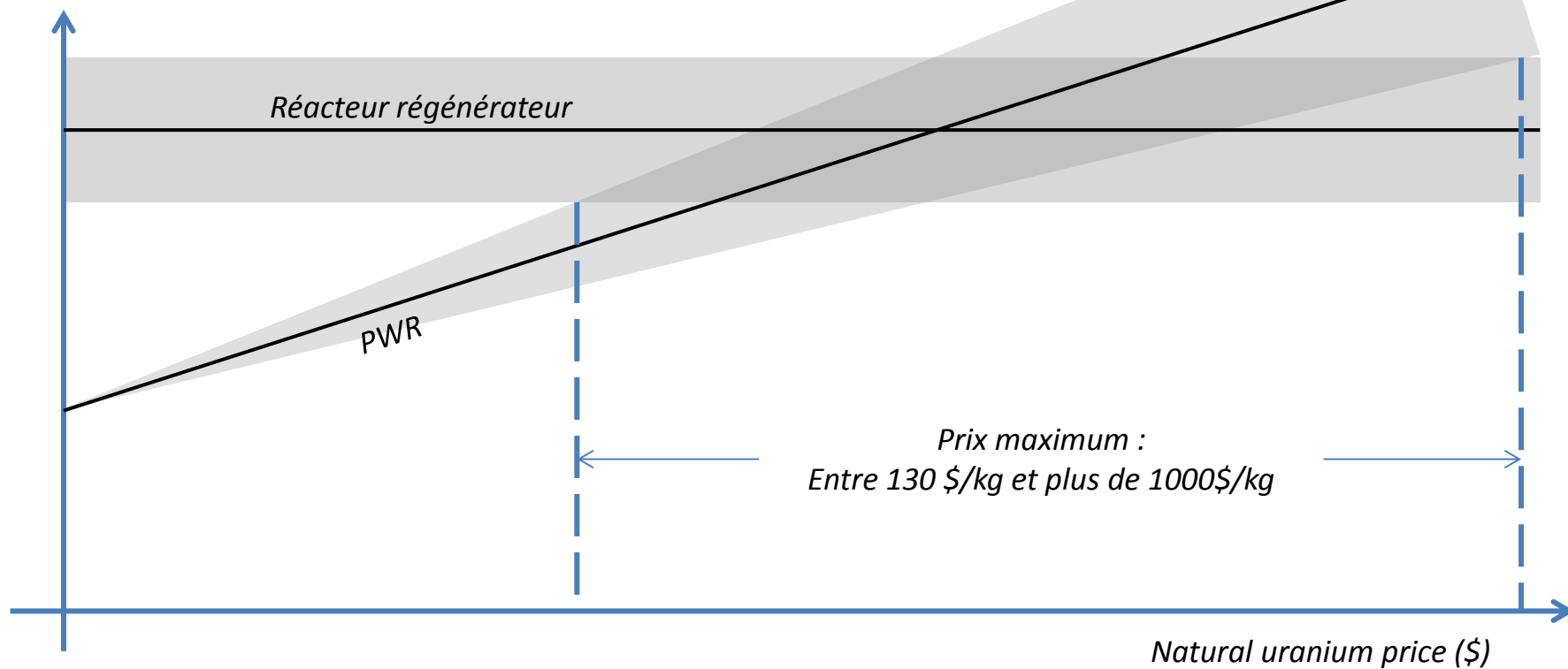
➤ **L'incertitude est forte sur le long terme mais il est nécessaire d'anticiper très en amont**

Intérêt économique d'un changement de technologie



Et avec les barres d'erreurs

Prix de l'électricité (\$)



Aujourd'hui : 285 GWe (équivalent pleine puissance)

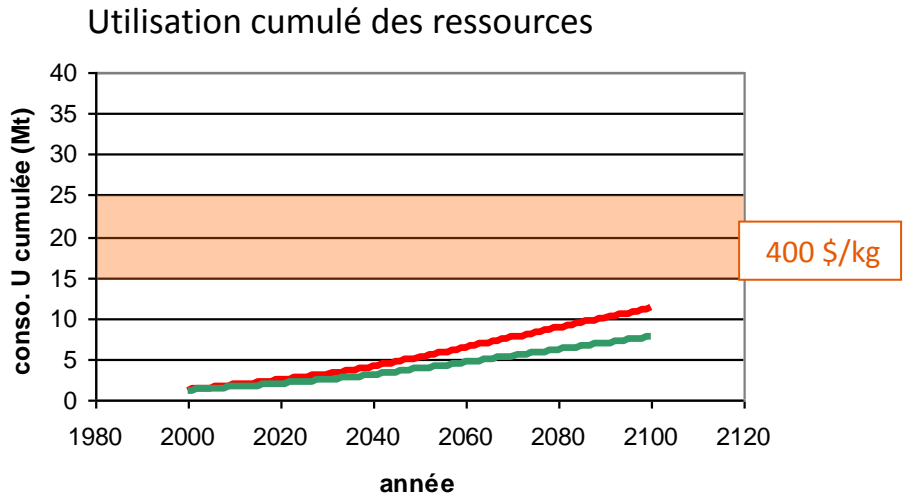
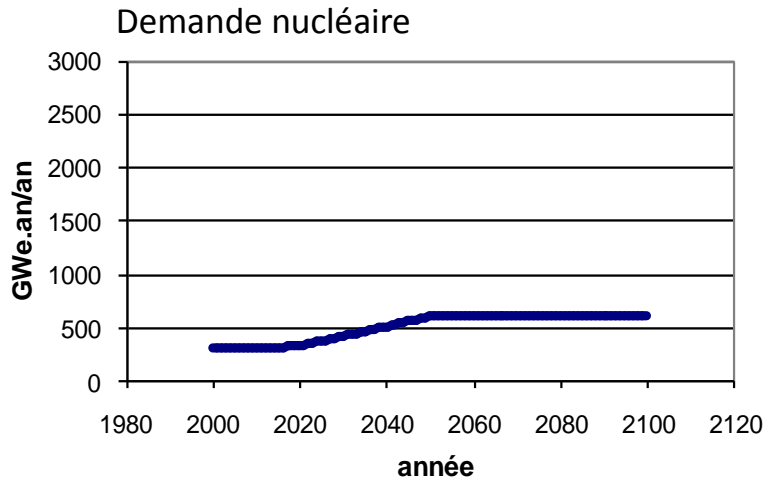
→ 60 000 tonnes d'uranium naturel consommé par an

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

Ressources d'uranium contre demande nucléaire

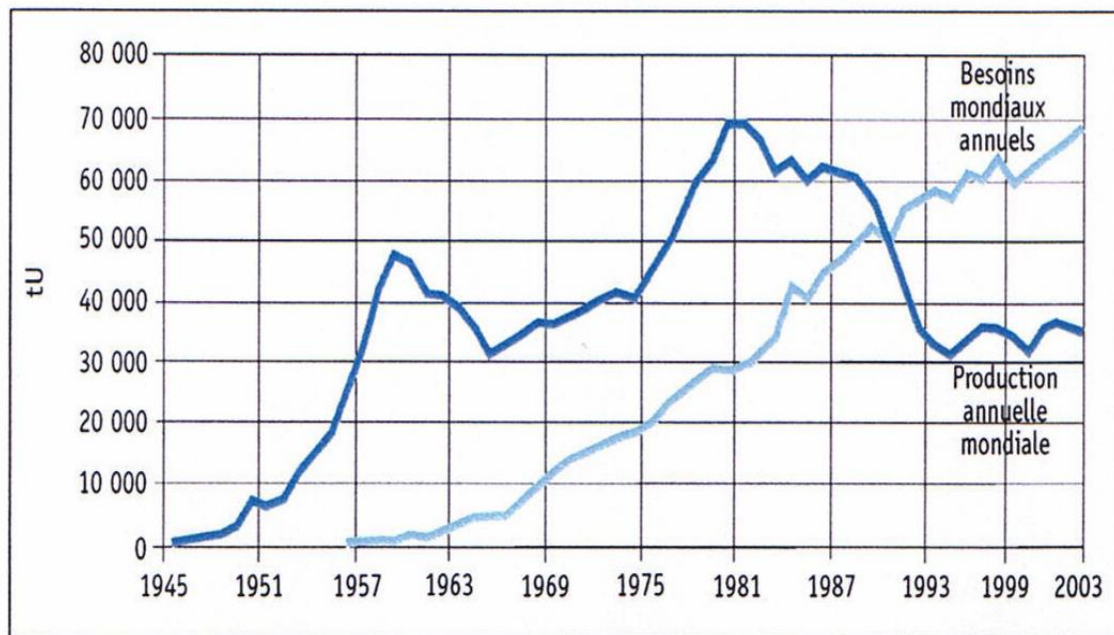
	millions of tons	
Réserves prouvées	< 80\$/kg	2.5
	< 130\$/kg	4.4
	AIEA	16
Ressources ultimes estimées		
Extrapolation linéaire « reserves vs. prix » à 400\$/kg (ref JF. Luciani, CEA)		23

- Aujourd'hui:
 - 45 000 tonnes d'Unat /an
 - Cigar lake :
 - ouverture prévue en 2007
 - ouverture réelle en 201?
 - Production de 10 900 t/an

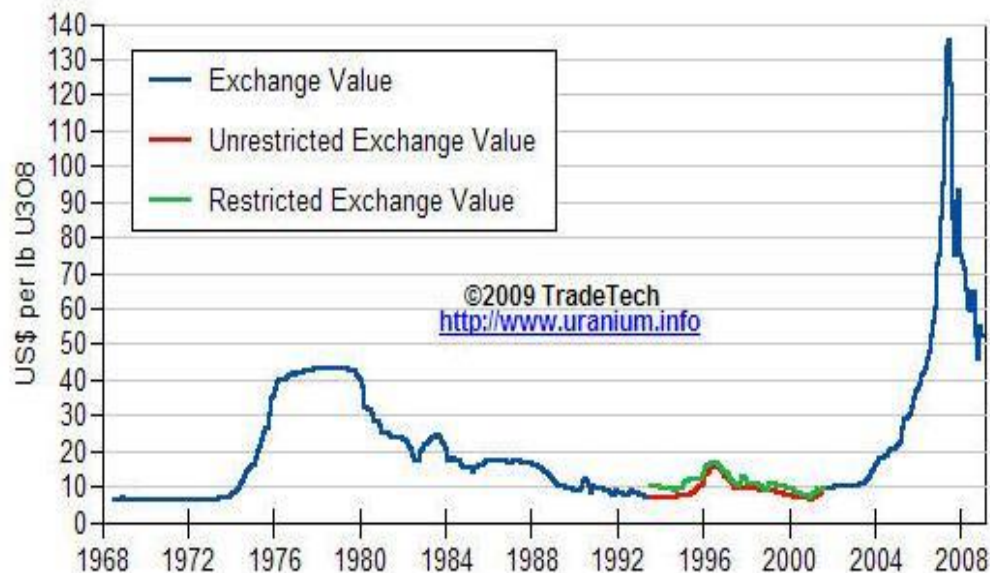


— 200t/(GWe.an)
 — 130t/(GWe.an)

Comment anticiper les tensions ?



La production d'uranium est largement en deçà des besoins
→ On vit sur les réserves



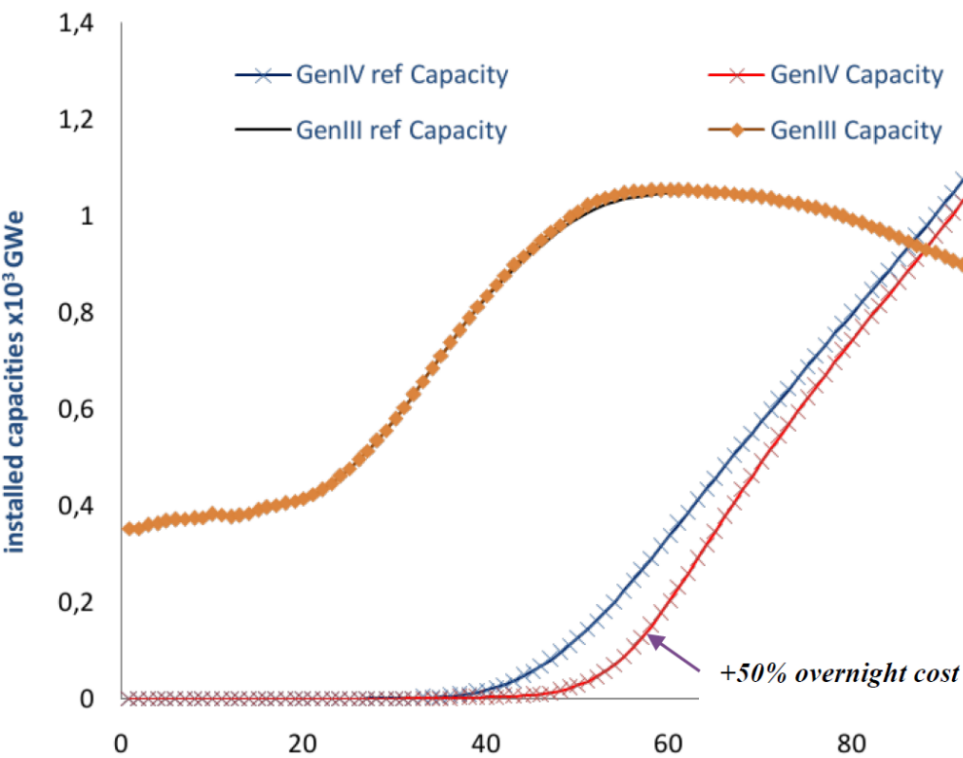
Cette situation risque de créer des tensions sur la capacité à extraire l'uranium du sol et non sur sa présence
→ Problématique différente de celle des fossiles

Un parc mix entre réacteur régénératif et réacteur à eau !

- Etudes technico-économiques faites avec POLES (Prospectives Outlook on Long Term Energy Systems)
On met en place une « peur de manquer » dans les scénarios

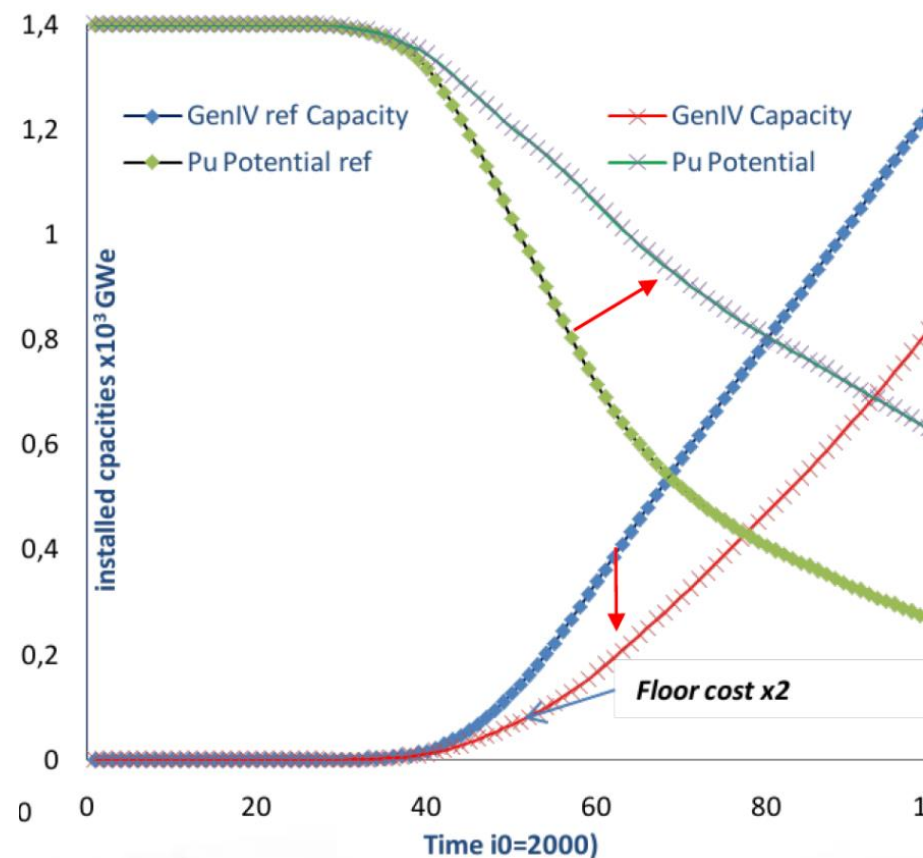
+50 % sur le cout des premiers réacteurs
(FOAK = First Of A Kind)

- **Retard** du démarrage des GEN IV mais déploiement équivalent à long terme
- **PAS d'impact** sur le déploiement des GEN III



+100 % sur le cout de long terme des GEN IV
(prix plancher)

- **Grosse réduction** du déploiement des GEN IV
- **PAS d'impact** sur le déploiement des GEN III



Ce qu'il faut retenir

- Le plutonium est une matière valorisable dans les réacteurs à neutrons rapides
 - La régénération permet de fonctionner « indéfiniment »
- Si l'augmentation du nucléaire est limitée 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

1/ Les ordres de grandeurs qui font mal

2/ Les bases de la sûreté nucléaire

3/ Les déchets nucléaires

4/ Les ressources en uranium naturel

5/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

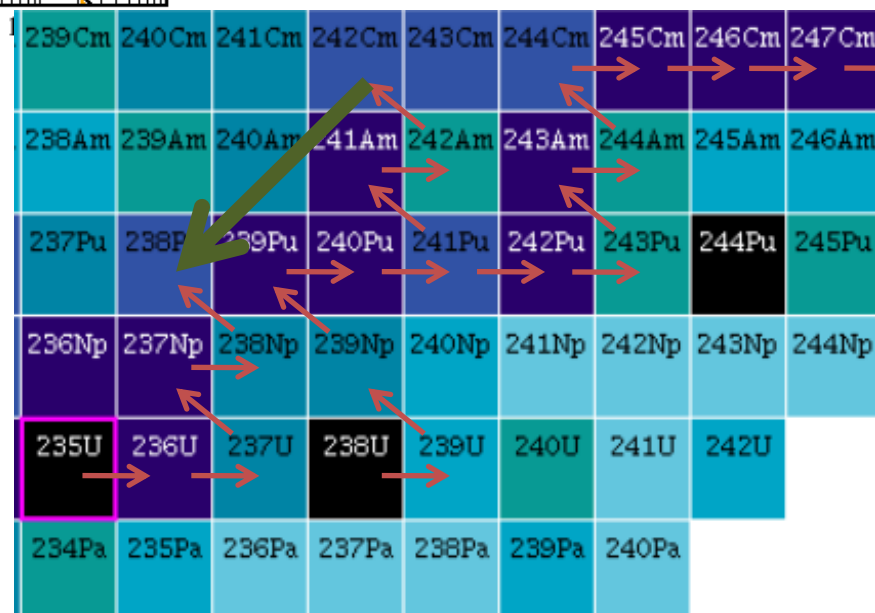
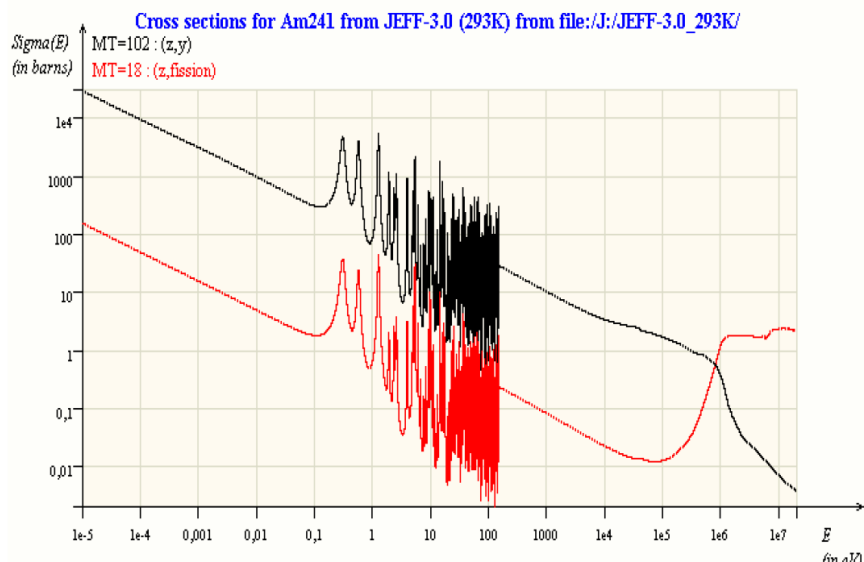
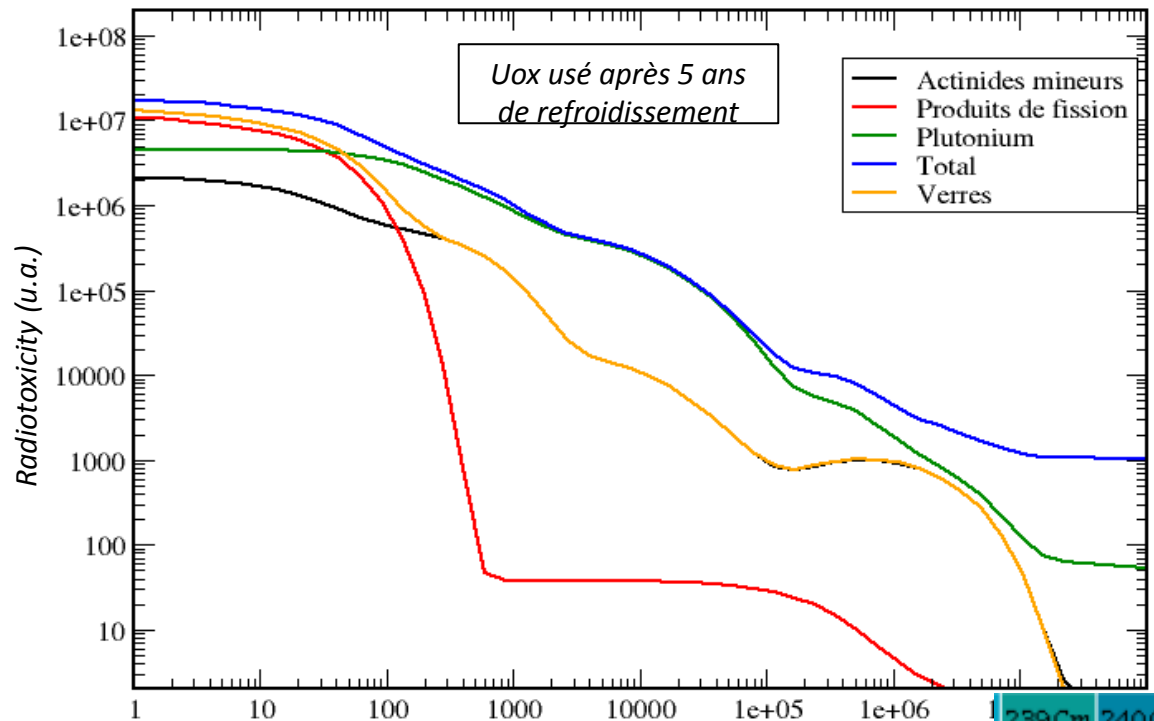
Qu'est ce que c'est ?

Deux stratégies équivalentes

Un choix futur fortement impacté par les décisions d'aujourd'hui

6/ Conclusions

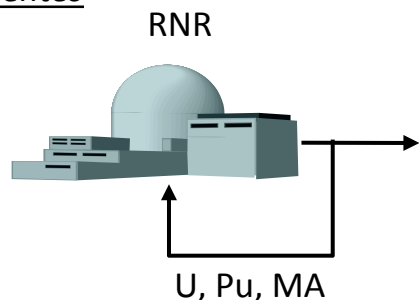
La transmutation : qu'est ce que c'est ?



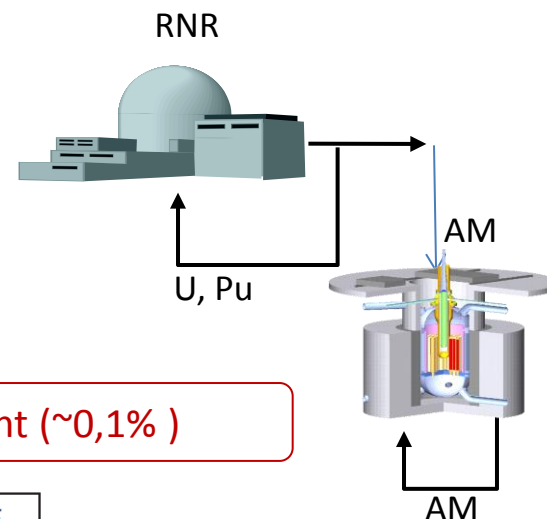
Transmutation des actinides mineurs

Deux stratégies différentes

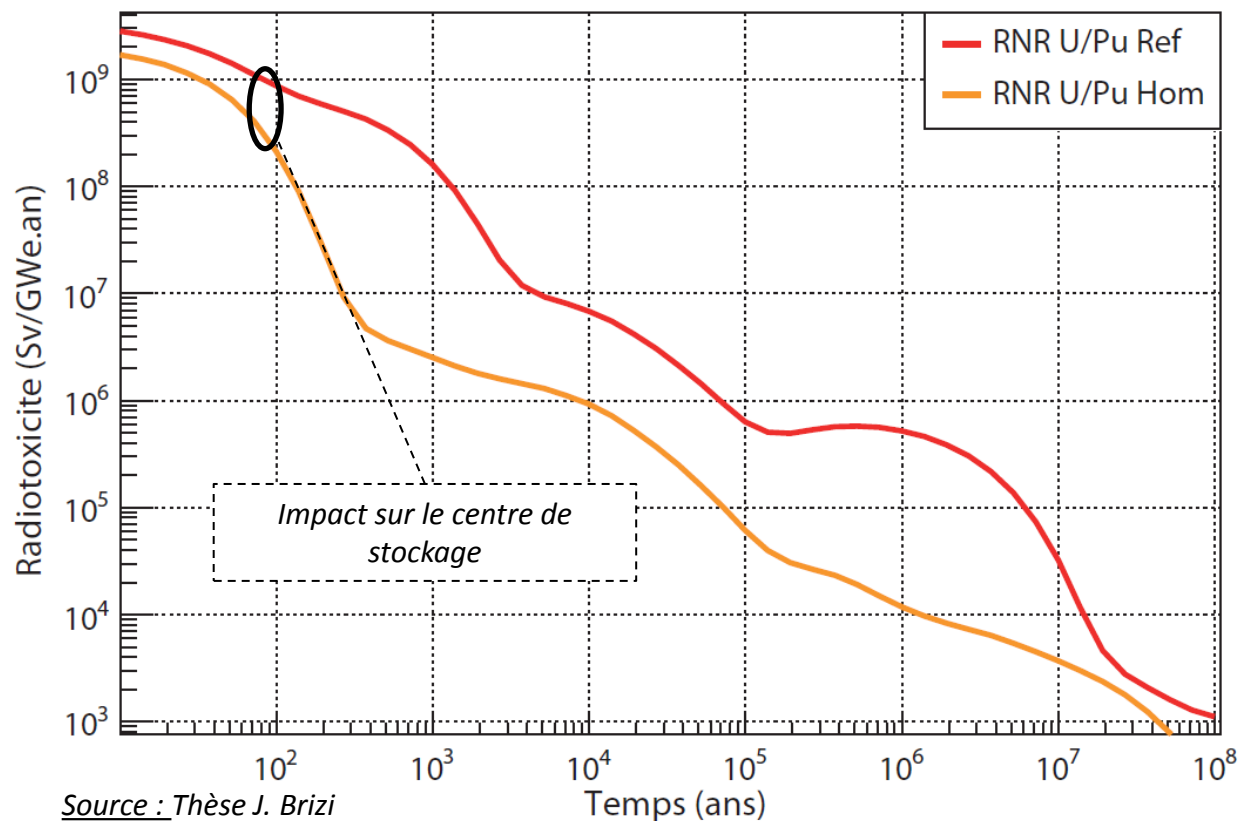
➤ Dans RNR



➤ ADS →
scénario
double strate



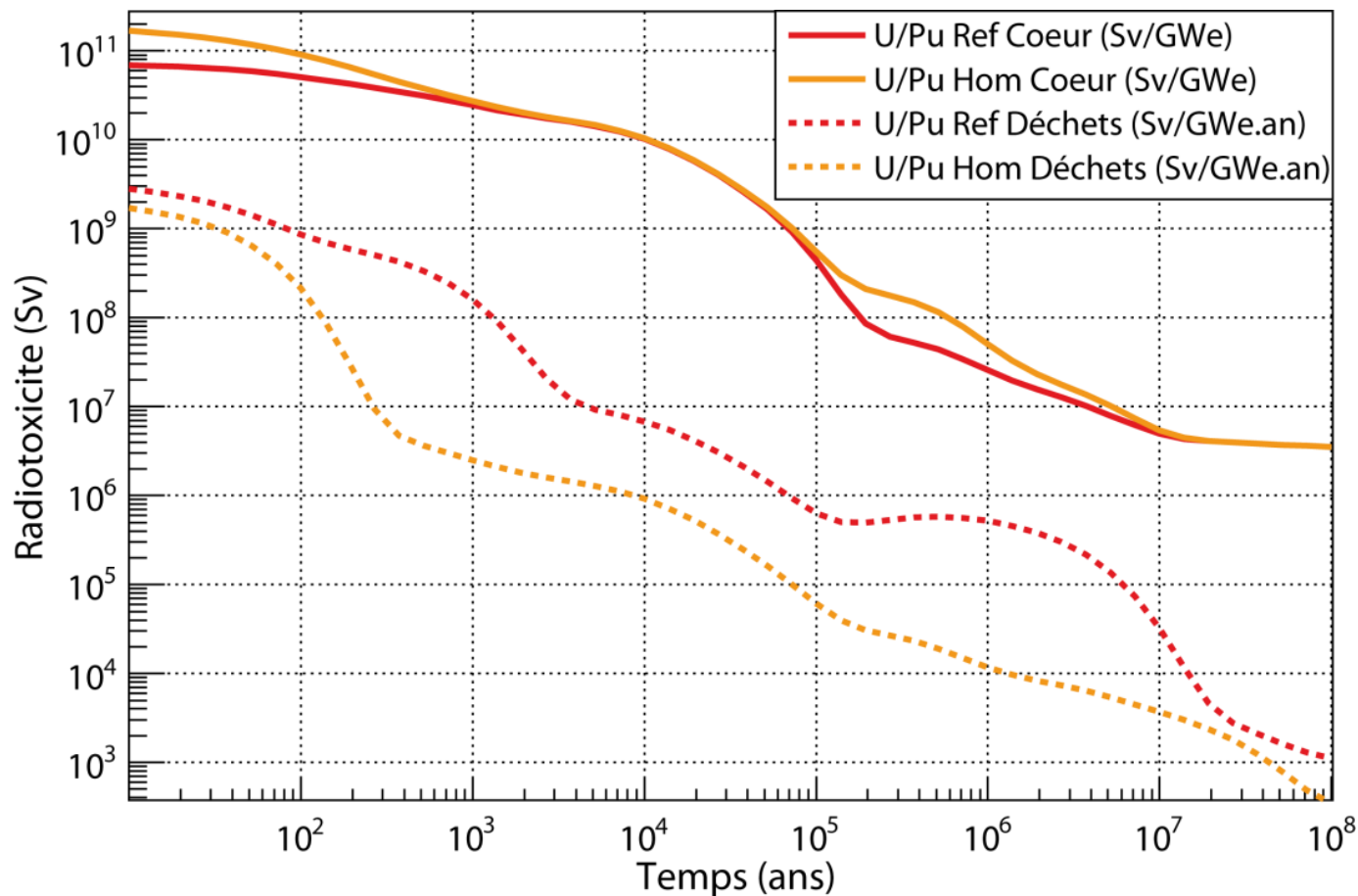
Déchets ↔ PF + pertes chimiques au retraitement (~0,1%)



Source : Thèse J. Brizi

- 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 ?

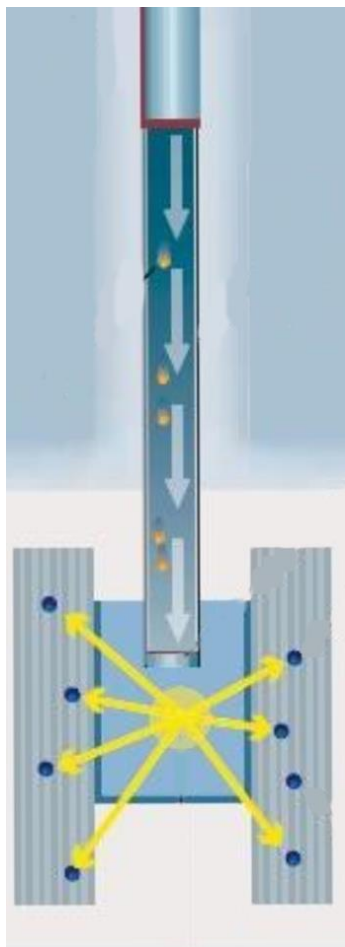


Dans un réacteur à spectre rapide, l'inventaire en plutonium est conséquent

- 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 !

Une parenthèse sur les ADS

- L'intérêt des ADS est de découpler l'aspect gestion des déchets de la production d'énergie
 - Pour des raisons de sûreté, on ne peut concevoir un combustible qui fonctionnerait en critique
 - On se place légèrement sous-critique ($k_{eff} = 0,95$) et on apporte des neutrons pour compenser la réaction en chaîne



- On envoie des protons très énergétiques sur une cible de plomb
 - On produit ~ 20 neutrons par protons de 1GeV

1^{er} génération $\rightarrow k_1$ neutrons

2^{ème} génération $\rightarrow k_1 k_2$ neutrons

3^{ème} génération $\rightarrow k_1 k_2 k_3$ neutrons

$$\lim_{i \rightarrow +\infty} k_i = k_{eff}$$

- La puissance du système est proportionnel à l'intensité du faisceau

$$P_{th}(t) = P_0 \cdot \frac{I(t) \cdot k_{eff}}{1 - k_{eff}}$$

Le réacteur ne doit jamais devenir critique

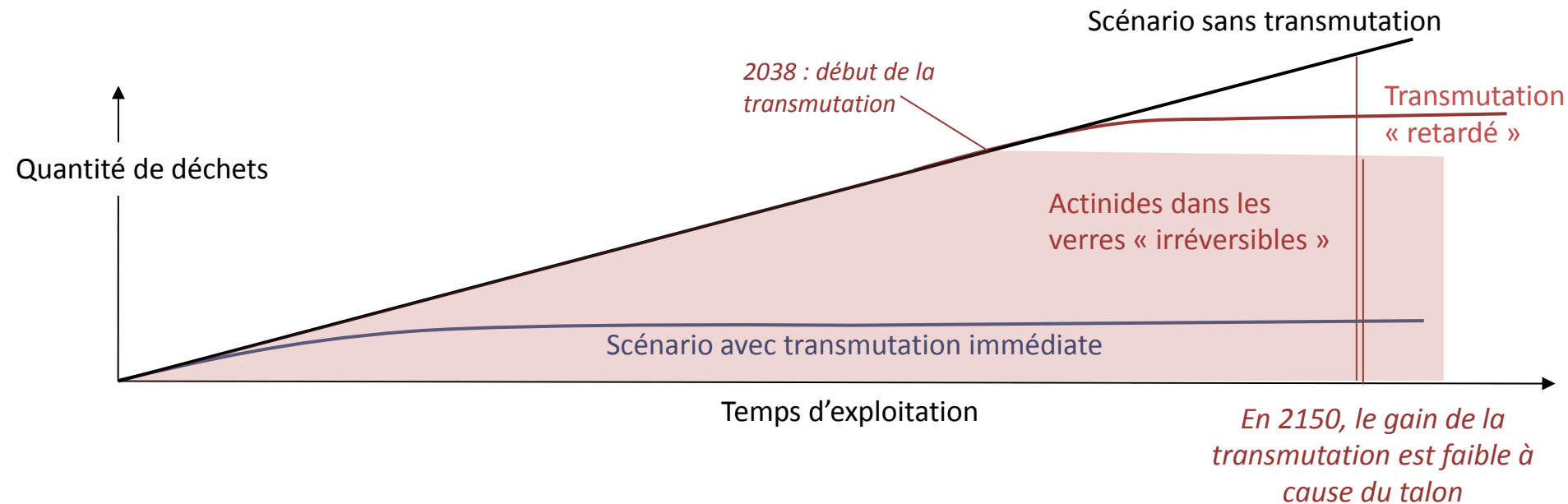
→ Il faut mesurer le coefficient de multiplication des neutrons « en ligne »

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

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

L'efficacité de transmutation dépend du :

- Flux (et donc la puissance)
- Temps effectif d'irradiation



- 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?

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	

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 bases de la sûreté nucléaire

3/ Les déchets nucléaires

4/ Les ressources en uranium naturel

5/ La valorisation des actinides mineurs : la transmutation

6/ 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

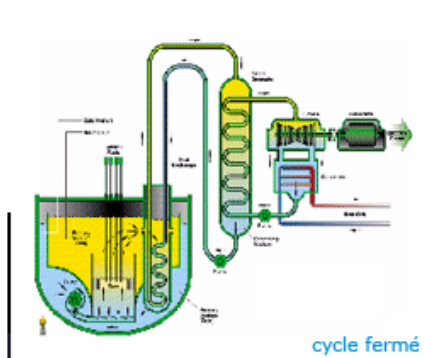
Réacteur de quatrième génération (GEN-IV)

Forum international pour instaurer une coopération internationale pour le développement des réacteurs du futur

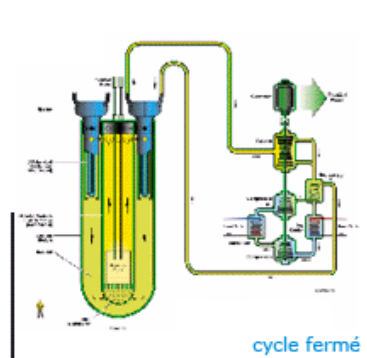
- Améliorer la sûreté nucléaire
- Améliorer la résistance à la prolifération
- Minimiser la production de déchets
- Optimiser l'utilisation des ressources naturelles
- Diminuer les coûts de construction et d'exploitation



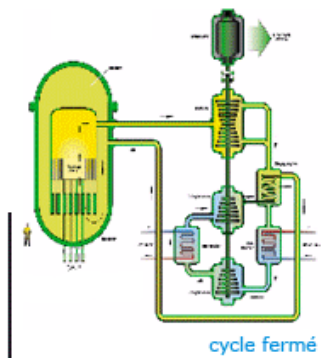
6 CONCEPTS INNOVANTS



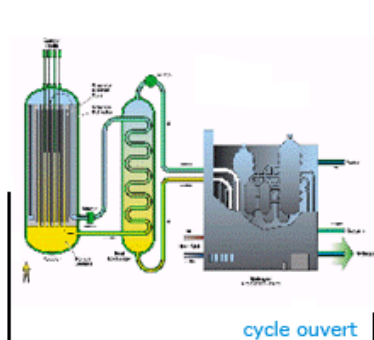
RAPIDE SODIUM



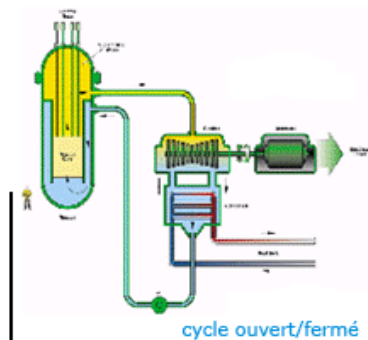
RAPIDE PLOMB



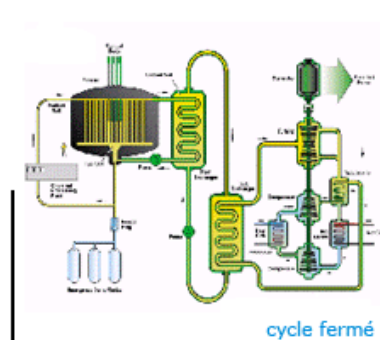
RAPIDE GAZ



TRES HAUTE TEMPERATURE



EAU SUPERCRITIQUE



SELS FONDUS

« Do some science, dig old reports »

Pour un réacteur il faut :

- Fuel : Uranium, Plutonium, Thorium, sous forme oxyde, métallique, carbure
- Caloporteur : eau légère, eau lourde, gaz, métal liquide
- Modérateur : eau, graphite, béryllium

CRCE • THRITS • LOFT • HTREI • ZPPR • FRAN • SUSIE • EBOR • EOGR • MLI • AIW • BORAX-IV • ETR • MTR • ATR • EBR II • SIW • ATRC • OMRE •

First Atomic Reactor Engine Successful by Land March 21, 1943

World's Largest Reactors for Radioisotope Testing

First U.S. City Lighted by Atomic Energy July 17, 1956

First Heat Electricity from Atomic Energy December 23, 1951

First Mobile Nuclear Power Plant for Army Use

WESTBANK coffeeshop

DAHO FALLS

NATIONAL REACTOR TESTING STATION

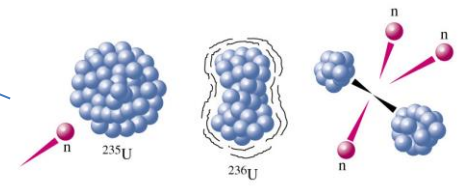
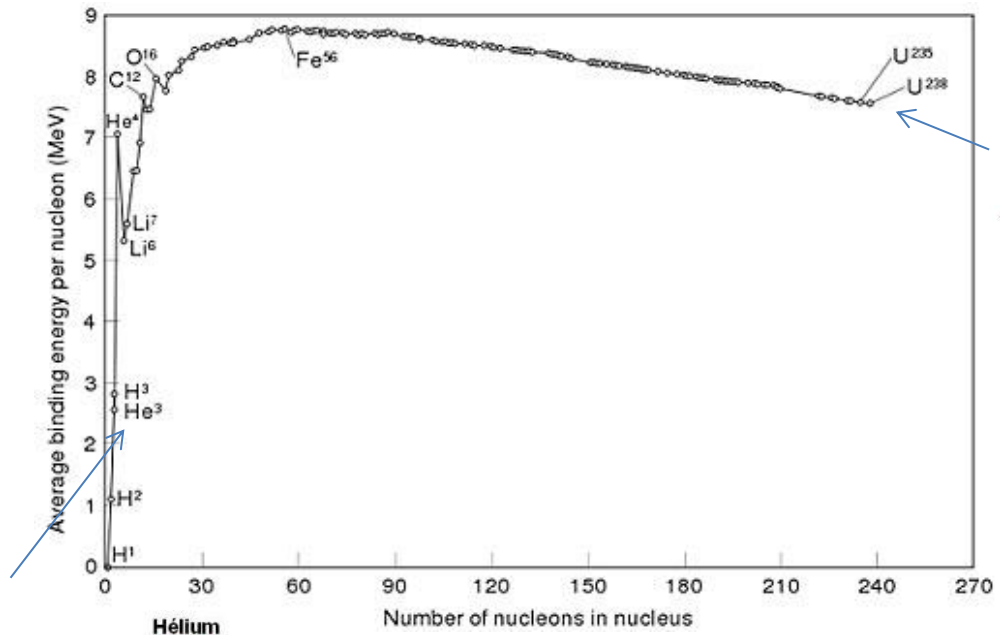
largest complex of nuclear reactors in the world...
50 reactors built since 1949

BORAX-I • BORAX-II • ASFR • SPERT-I • SPERT-II • SPERT-III • SPERT-IV • BORAX-V • TREAT • HOTCE • BORAX-III • SNAPTRAN • 10A • S5G

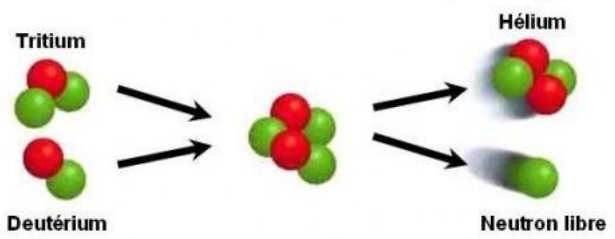
Ancienne affiche pour l'Idaho National Laboratory

Un mot sur la fusion

Les deux manières de tirer de l'énergie du noyau



Fusion nucléaire



Quelle énergie massique par rapport à la fission ?

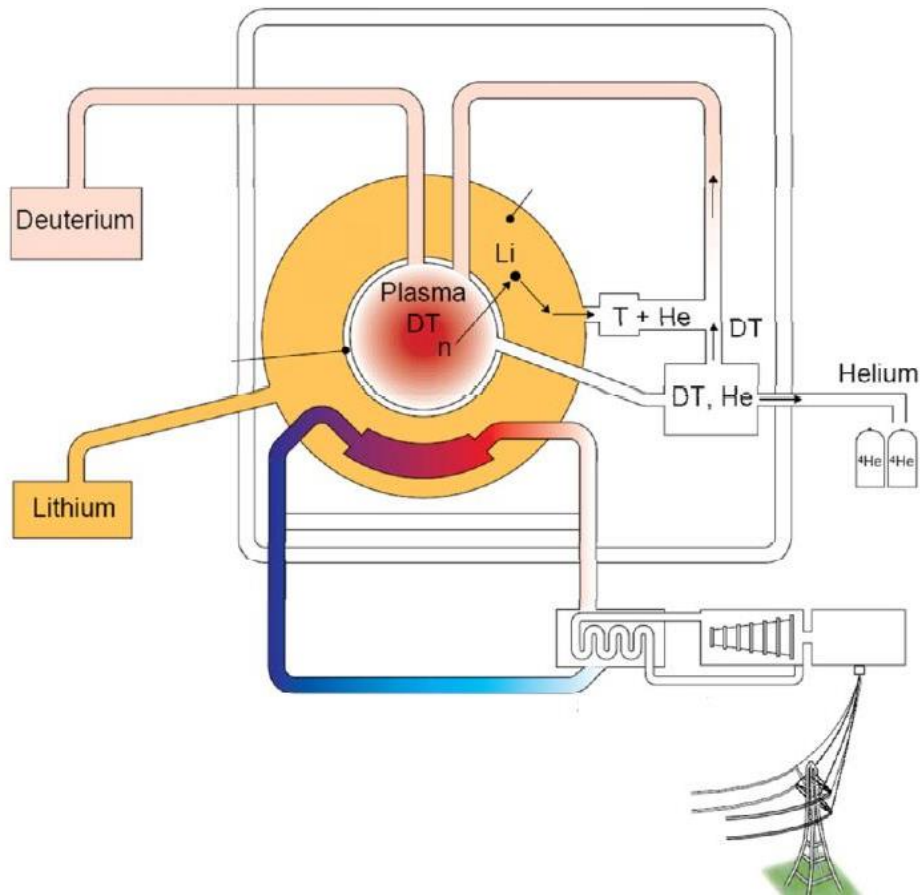
$$\begin{aligned} B/A (\text{He}) &= 7,1 \\ B/A (\text{d}) &= 1,1 \\ B/A (\text{t}) &= 2,8 \end{aligned}$$

$E = 17,8 \text{ MeV}$ pour 5 unités de masse
A comparer à 200 MeV pour 235 unités de masse

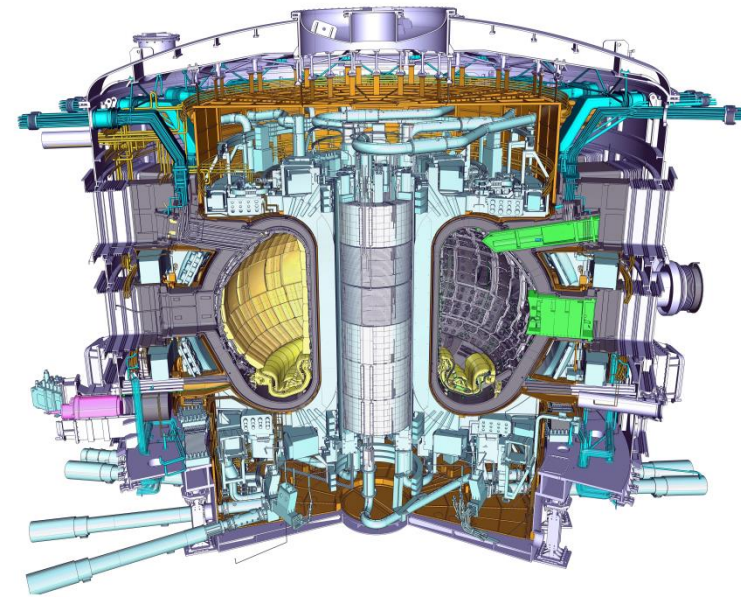
Deux problématiques :

- Il faut vaincre la répulsion coulombienne
- Il faut trouver un processus de conversion pour une réaction en chaîne

Schéma d'un réacteur de fusion D-T



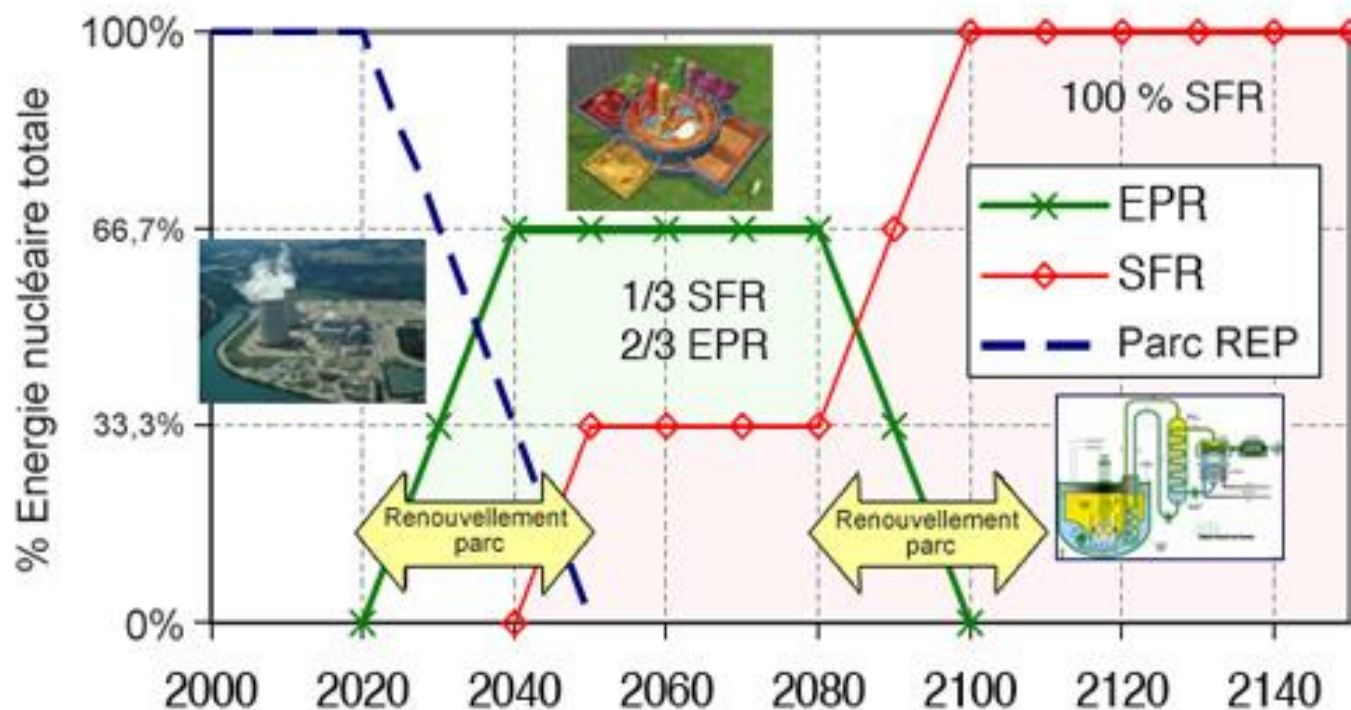
- La répulsion coulombienne est vaincu grâce à l'énergie cinétique des réactifs
→ Utilisation de plasma
- Confinement magnétique
→ Bobine supra (4K à 1m du plasma)
- Les neutrons sont porteurs de l'essentiels de l'énergie
→ Matériaux résistants aux neutrons
- Régénération du tritium (demi-vie de 13 ans)
→ ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{t} + {}^4\text{He}$
→ La ressource rare est le lithium



- ITER : 500 MW thermique pendant qq minutes
→ Durée totale de fonctionnement 400 heures
→ Pas de raccordement au réseau

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

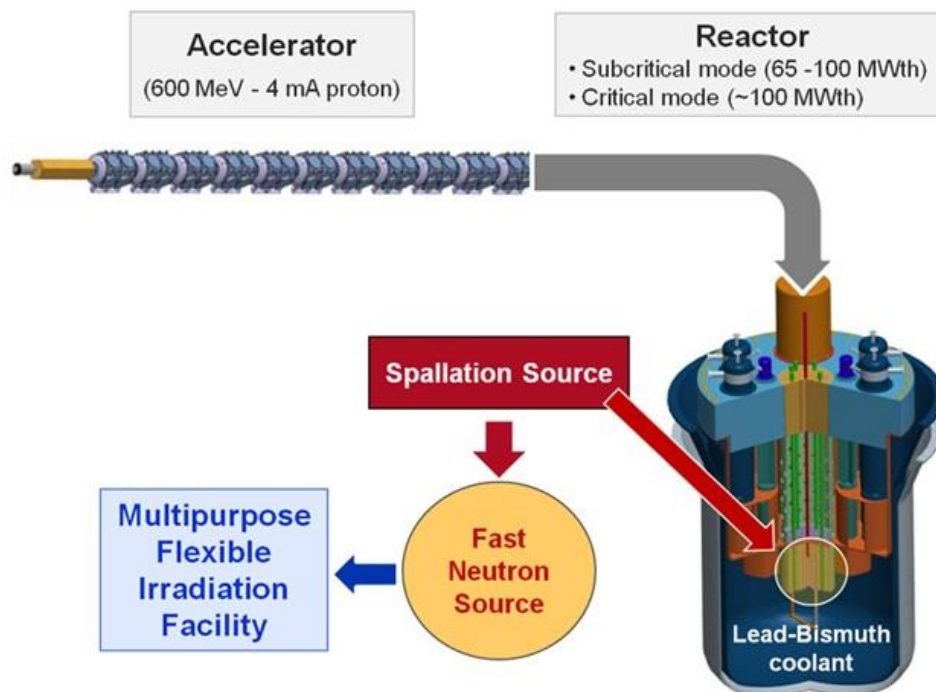
➤ Cycle du thorium

➤ 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

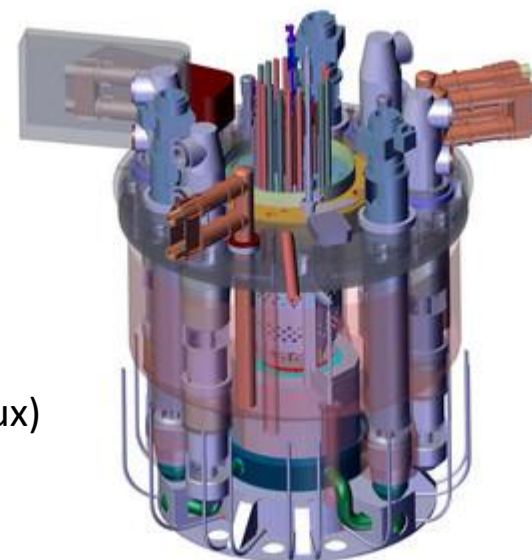


MYRRHA (SCK-CEN ; Belgique)

- 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





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