

QUELLE PLACE POUR LE THORIUM DANS LE DEVELOPPEMENT DU NUCLEAIRE DU FUTUR ?

Eléments de réponses apportés par les
recherches en cours dans les laboratoires
du CNRS/IN2P3

Adrien Bidaud

Groupe Physique des Réacteurs
Laboratoire de Physique Subatomique et Corpusculaire
IN2P3/CNRS

Ecole Nationale Supérieure de Physique de Grenoble
Institut National Polytechnique Grenoble

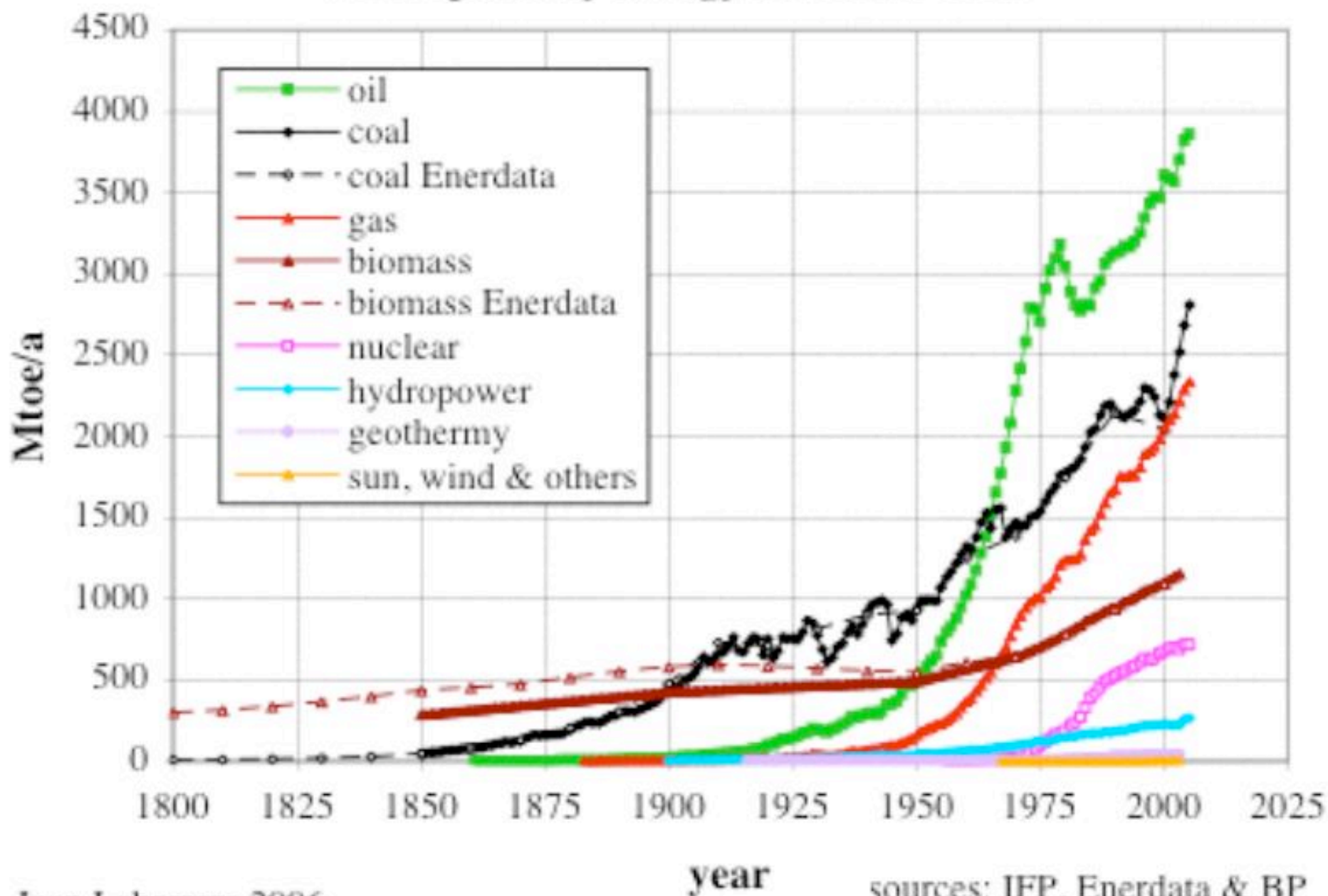
bidaud@lpsc.in2p3.fr



In2p3



World primary energy mix 1800-2005



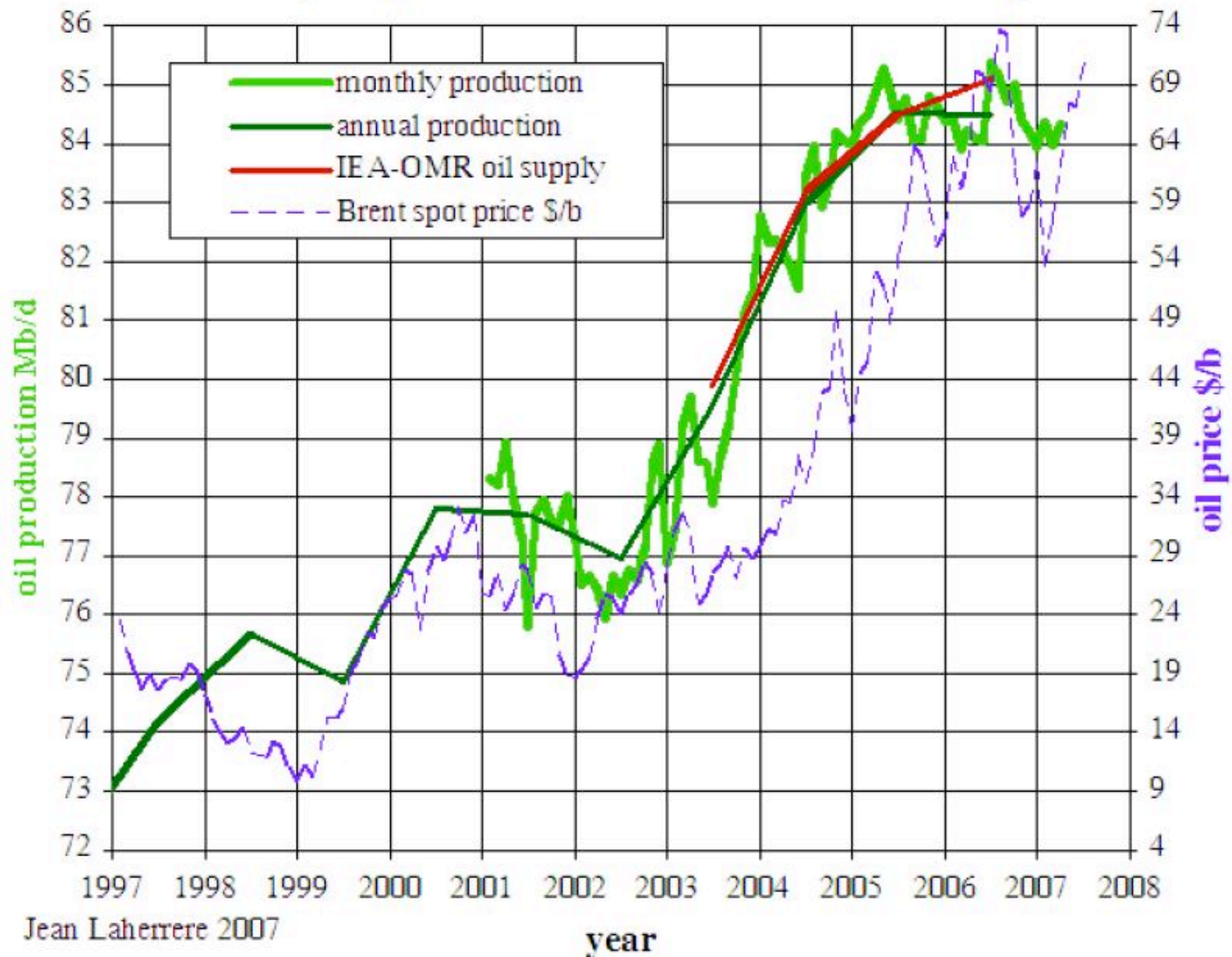
Jean Laherrere 2006

A. Bidaud

Séminaire « Thorium » - LAL Orsay - Mars 2009

2

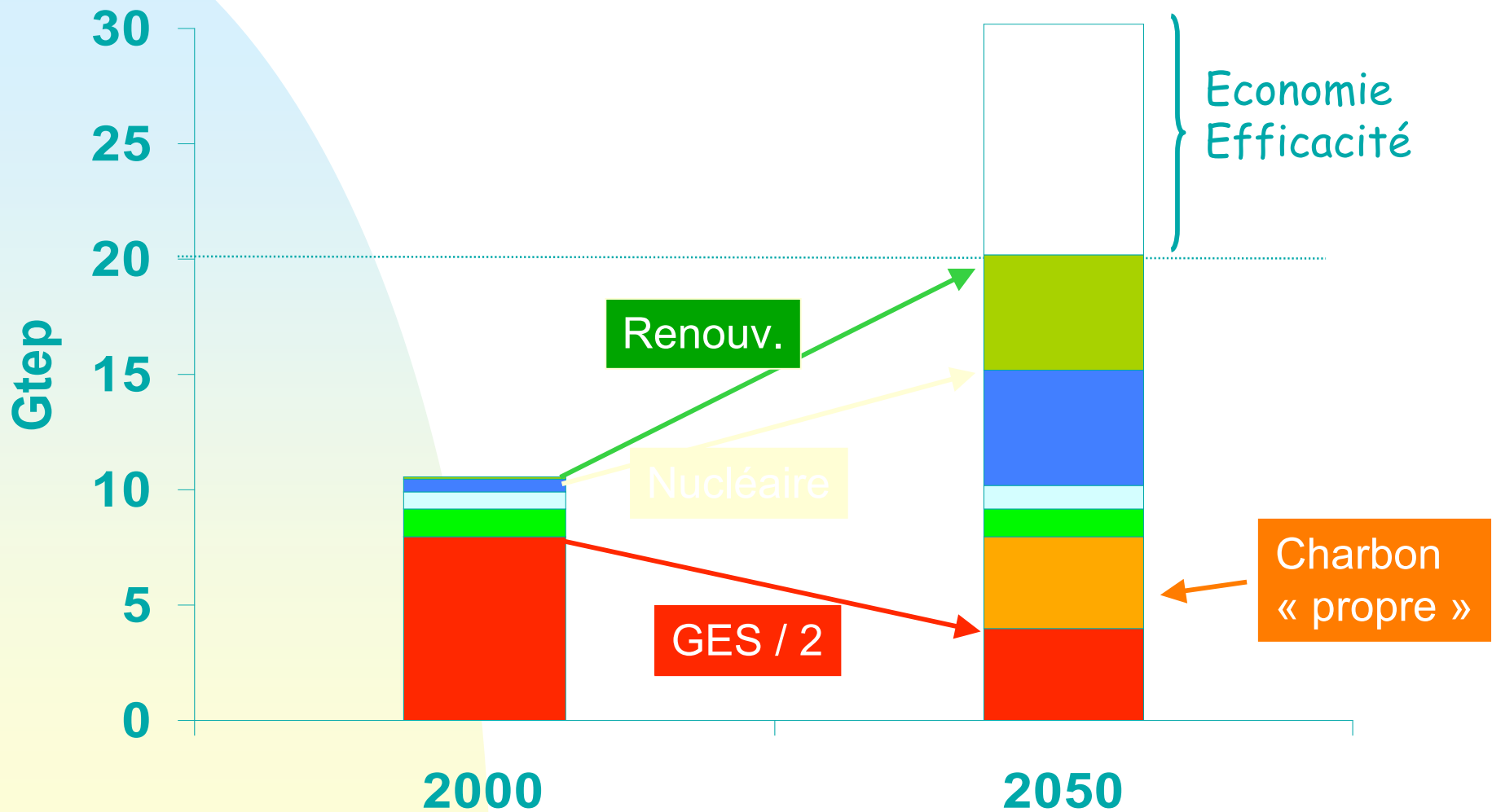
World liquids production from USDOE/EIA 1997-Apr.2000



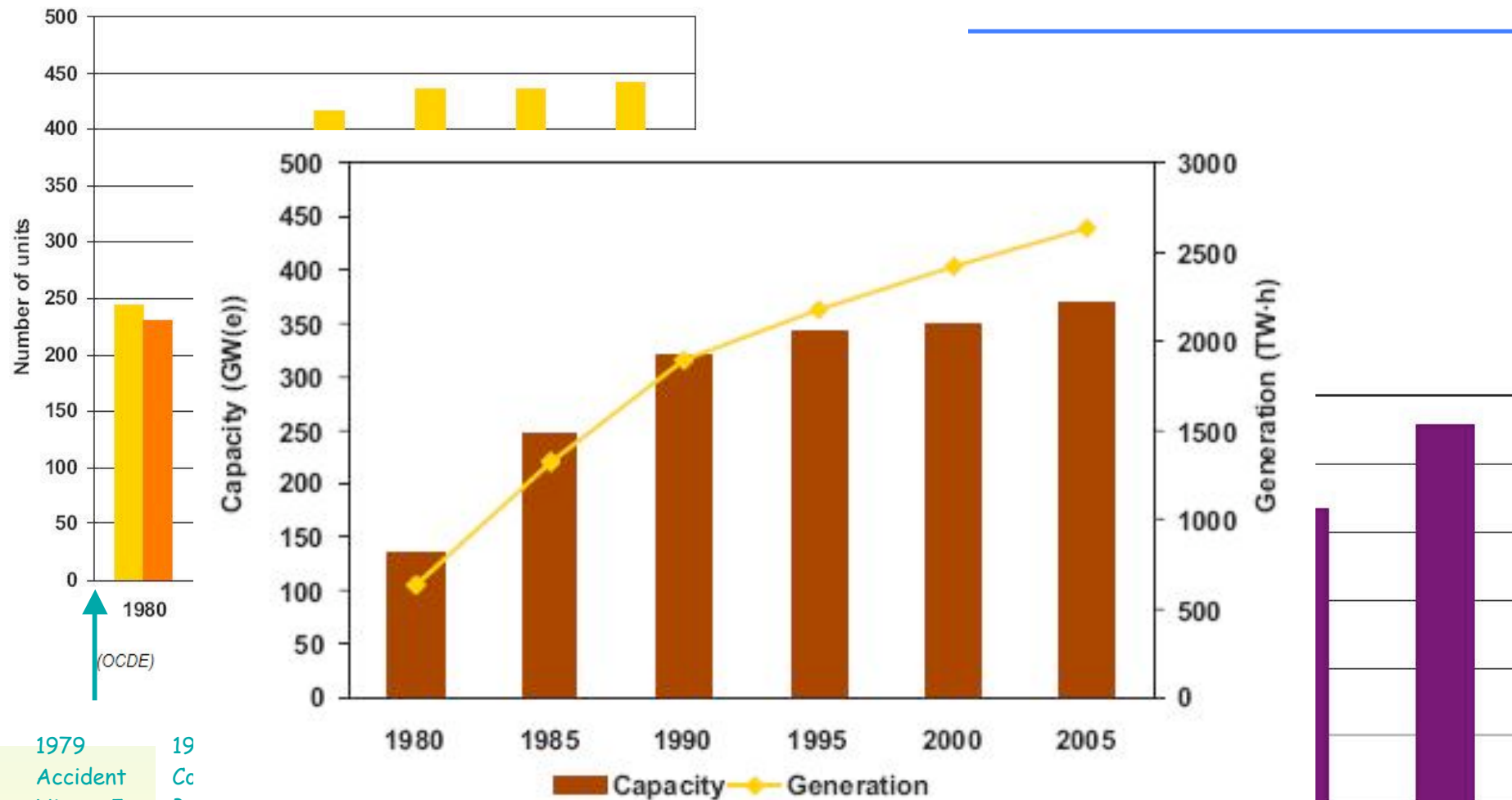
Effet de serre
Source GIEC

Contexte énergétique : le casse-tête

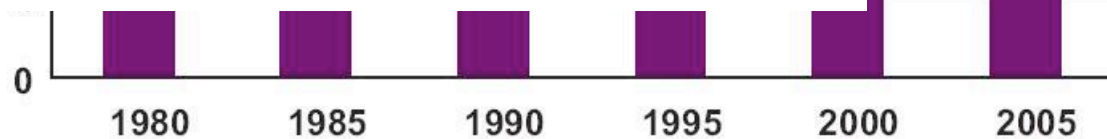
ordres de grandeur scénario « facteur 4 nucléarisé »



Une "renaissance" nucléaire ?



The world's nuclear power capacity and generation.



Nuclear power generating capacity in the Far East.

1979 Accident Niveau 5 TMI (USA)
1980 (OCDE)
1985 Cc Ba

Quel potentiel pour les réacteurs de Generation II et III ?

Consommation d'Uranium dans un Réacteur à Eau sous Pression (REP)

U	/(GWe.y)
fissionné	1 t
Enrichi (²³⁸ U ~ 96%, ²³⁵ U ~ 4%)	30 t
Naturel (²³⁸ U ~ 99.3%, ²³⁵ U ~ 0.7%)	200 t

- utilisation de la ressource ~ 0.5 %
- Optimisations → 1%
 - réduction des ²³⁵U laissé dans l' U appauvri,
 - augmentation du taux de combustion (burn-up),
 - retraitement & re-enrichissement de l'U irradié

→ La connaissance des ressources d'uranium devrait donner une idée du potentiel de production...

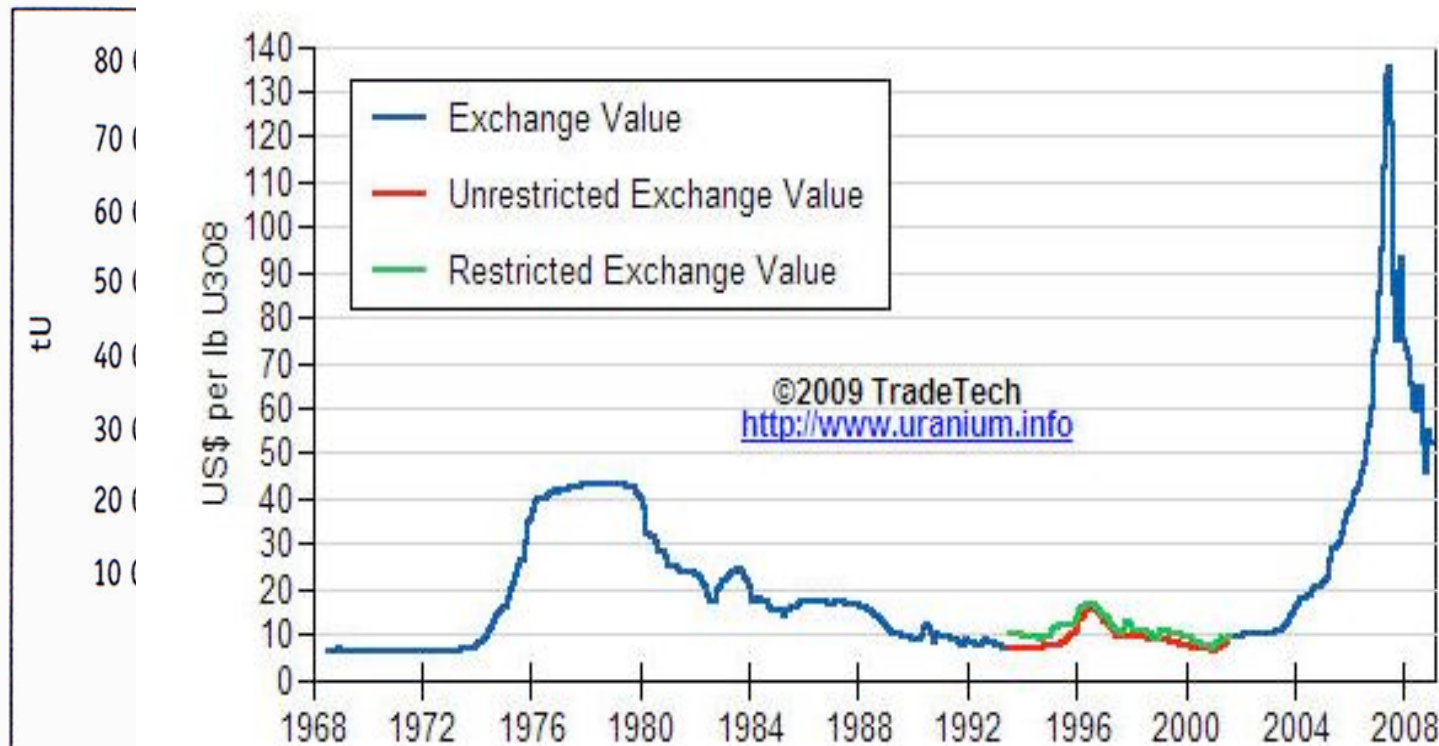
Consommation des Ressources

Production nucléaire mondiale

285 GWe (equiv.)

Consommation mondiale d'U naturel

60,000 t/an

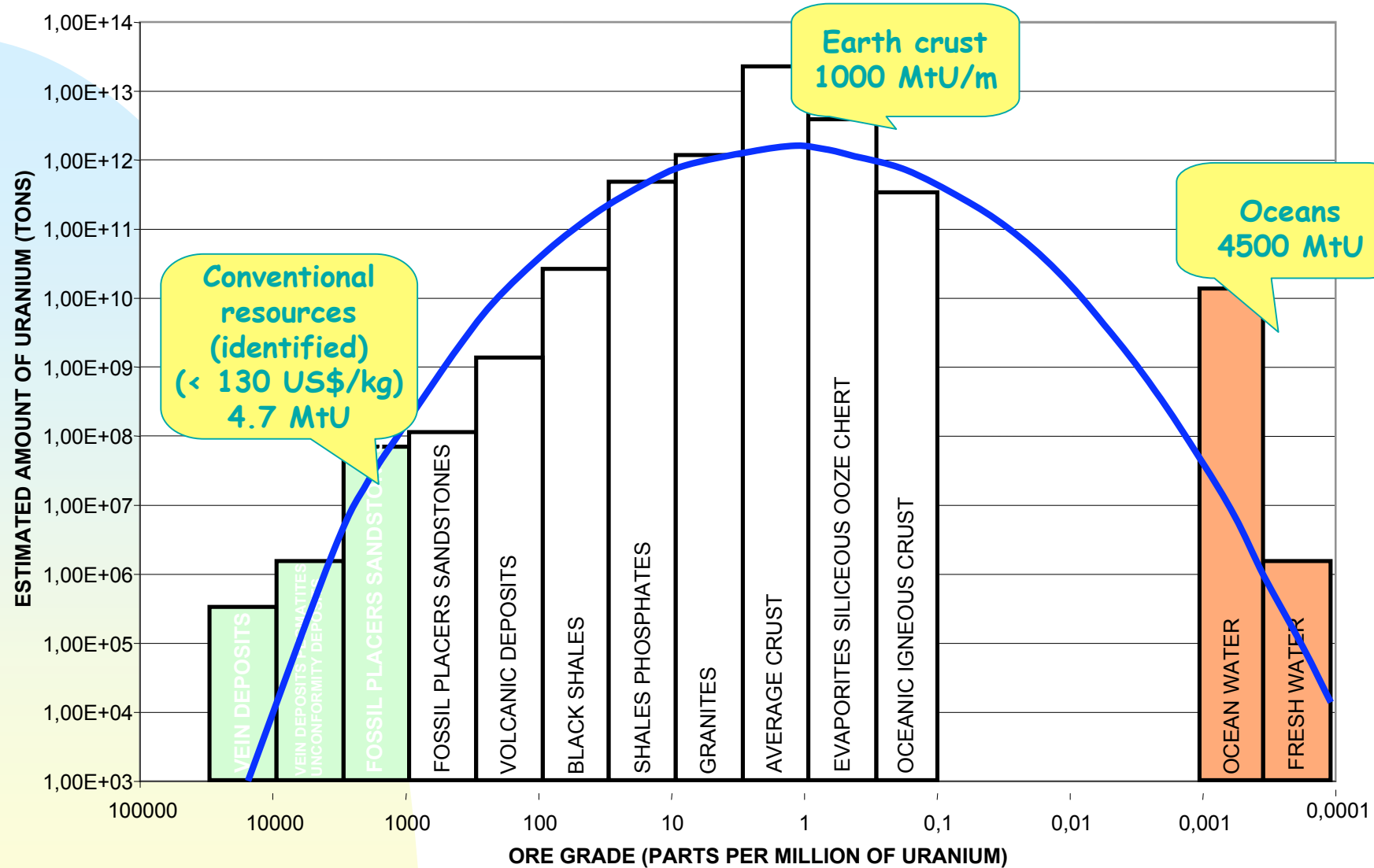


(OECD, 2006)



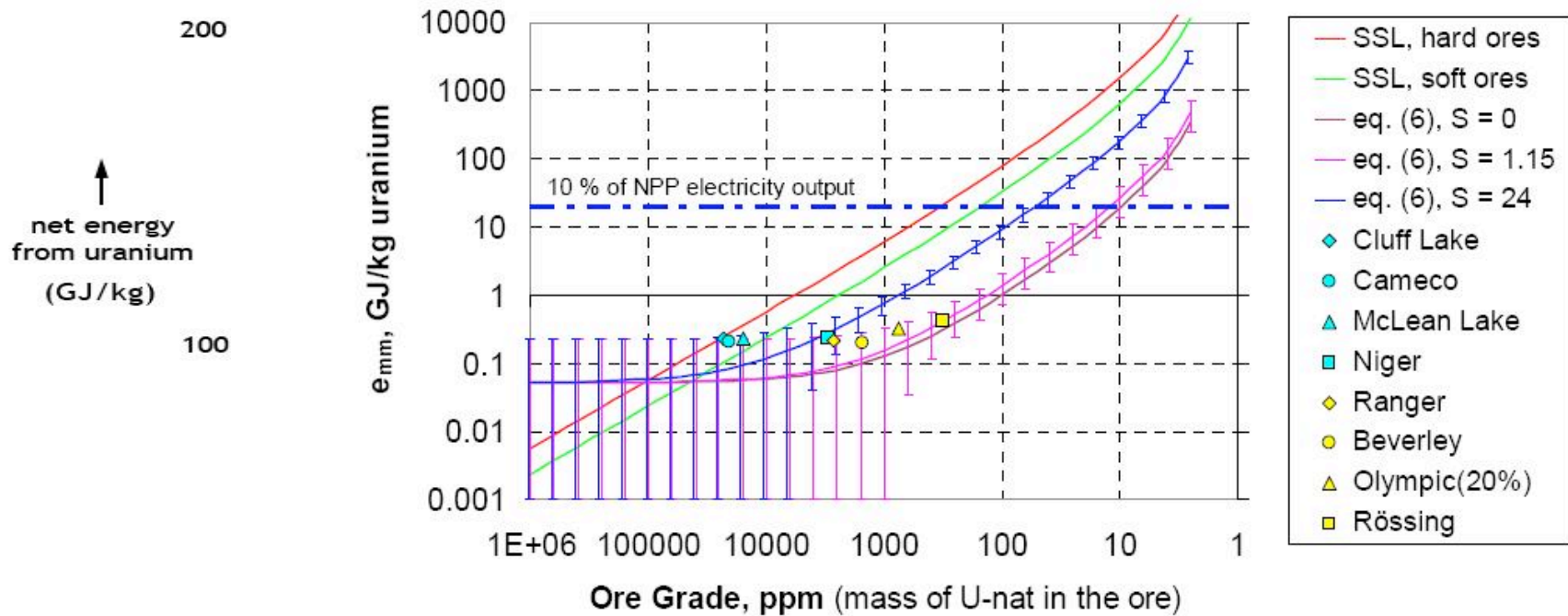
Faut-il s'attendre à un « uranium peak » ?
Quelle est la définition des ressources ?
 $6G\$/an = 1,5 * \text{pétrole} / \text{jour}$

URANIUM RESOURCES



Il y aura toujours de l'uranium. A quel prix ?

Where is the Energy Cliff ?



o Fig. 4. Specific energy requirements for mining and milling according to SSL and eq. (6) (Chapman, 1975, fitted to Rössing data) in comparison with real mine data from Mudd & Diesendorf (2007) (points⁶) and the output of a modern LWR per kg natural uranium

285 GWe (full power equiv.)

=====

60,000 t/year

Resources U (reserves+RAR+Inferred Resources)

12-25 millions of tons ??

Production Potential

- at present rate (and use)

200 - 400 years

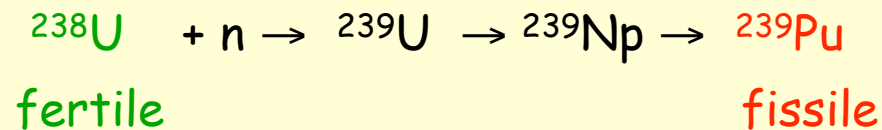
- scenario « nuclear x 8 »

≈ 50 - 100 years


& optimizations of U nat use in LWR

Régénération

But the production potential can change...because of breeding




Also possible
from ${}^{232}\text{Th}$

Conversion Ratio $CR = \frac{\text{mass of Fissile produced}}{\text{mass of Fissile destroyed}}$ 

- $CR \geq 1 \rightarrow$ Breeder
- $CR < 1 \rightarrow$ Burner

(Self-)Breeding

- the fissioned Pu is regenerated ($CR=1$) : Pu mass = constant
- U is consumed at a rate of 1 ton / (GWe.y)  (200 x less than LWR)
- efficiency of resource utilization ~ 100 %

But

- More complex technology
- Higher investment costs

La régénération

La régénération a besoin de neutrons

Pour une fission



ν

neutrons sont produits

1

neutron induit la fission



α

neutrons capturés = $\sigma^{\text{cap}} / \sigma^{\text{fis}}$ du noyau fissile

$1 + \alpha$

neutrons capturés sur le fertile pour régénérer le fissile

$$\nu - 2 (1 + \alpha) > 0 \quad \Rightarrow \text{régénération possible}$$

$$< 0 \quad \Rightarrow \text{régénération impossible}$$

$$\nu \text{ et } \alpha = \frac{\sigma_{\text{fissile}}^{\text{capture}}}{\sigma_{\text{fissile}}^{\text{fission}}}$$

→ Caractéristiques du noyau **fissile** uniquement

La régénération

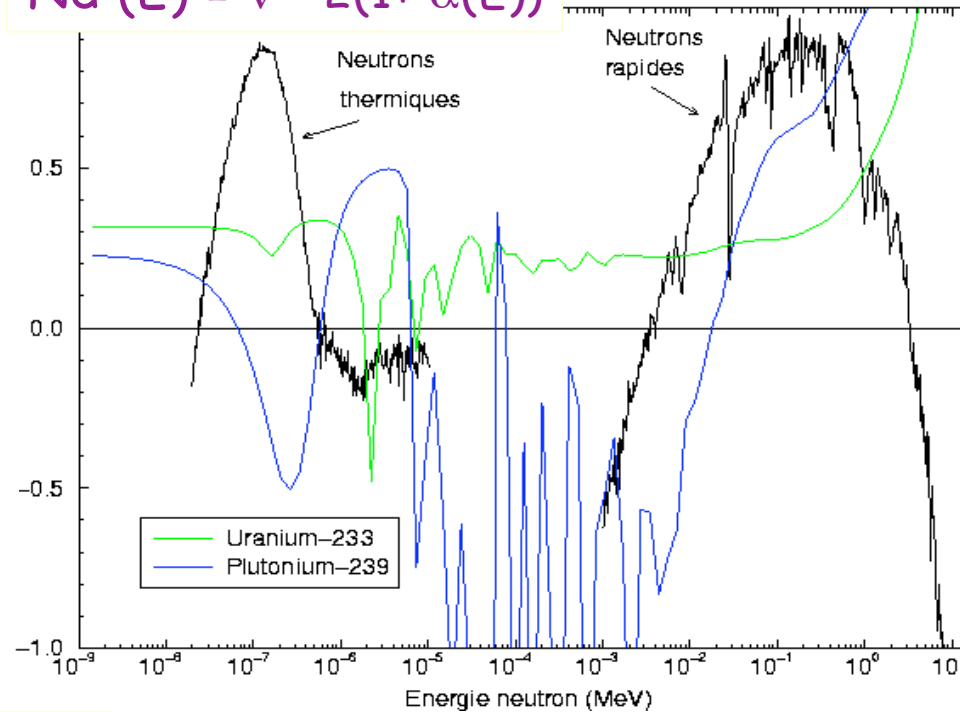


Spectre
thermique

Th/U Nd > 0

U/Pu Nd < 0

$$Nd(E) = \nu - 2(1 + \alpha(E))$$

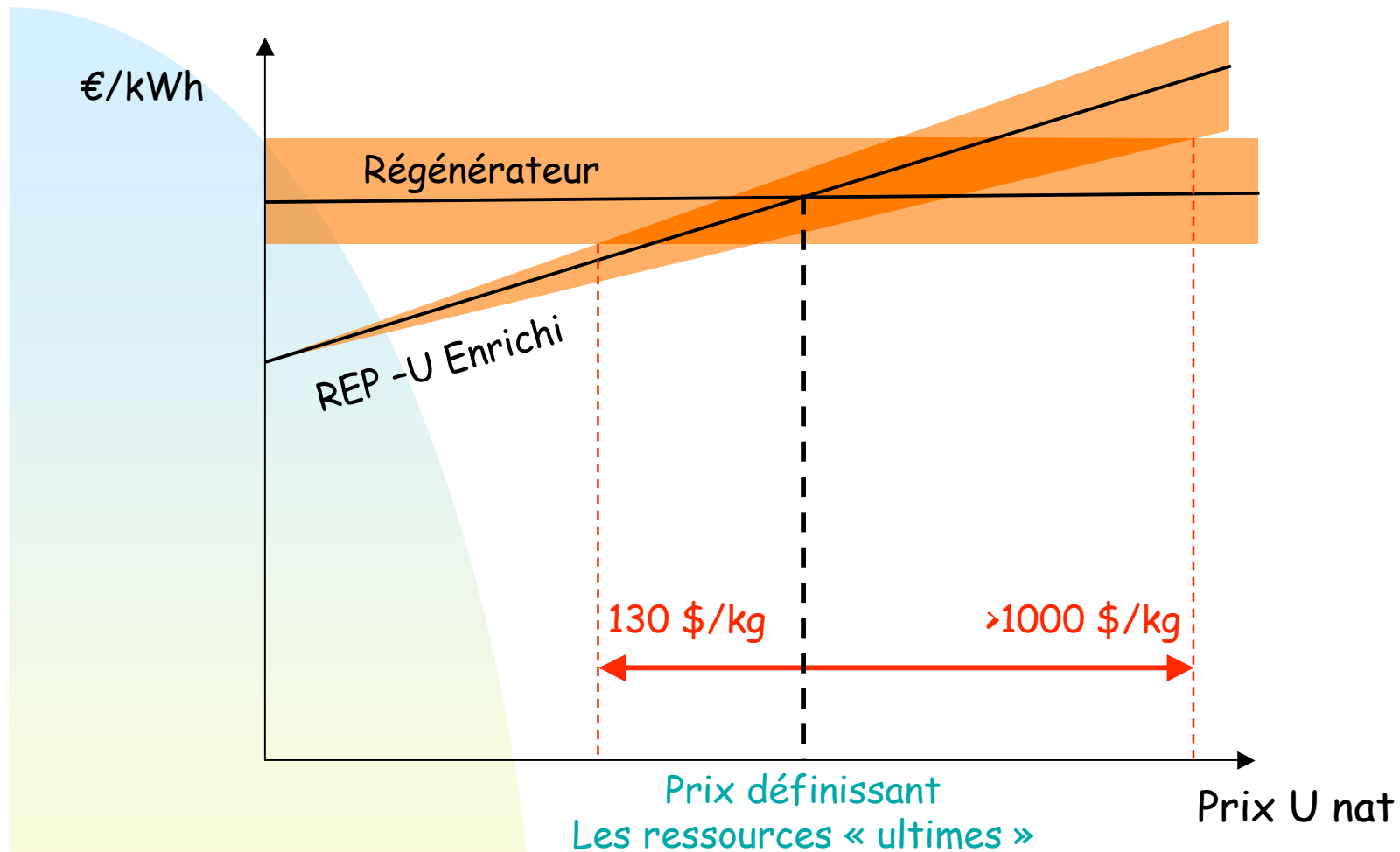


Spectre
rapide

Th/U Nd > 0

U/Pu Nd > 0

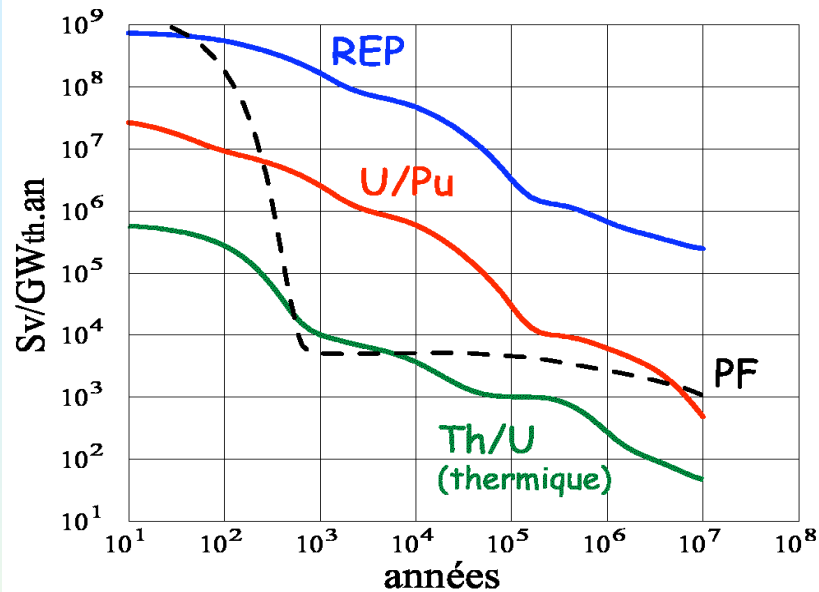
Régénération & ressources



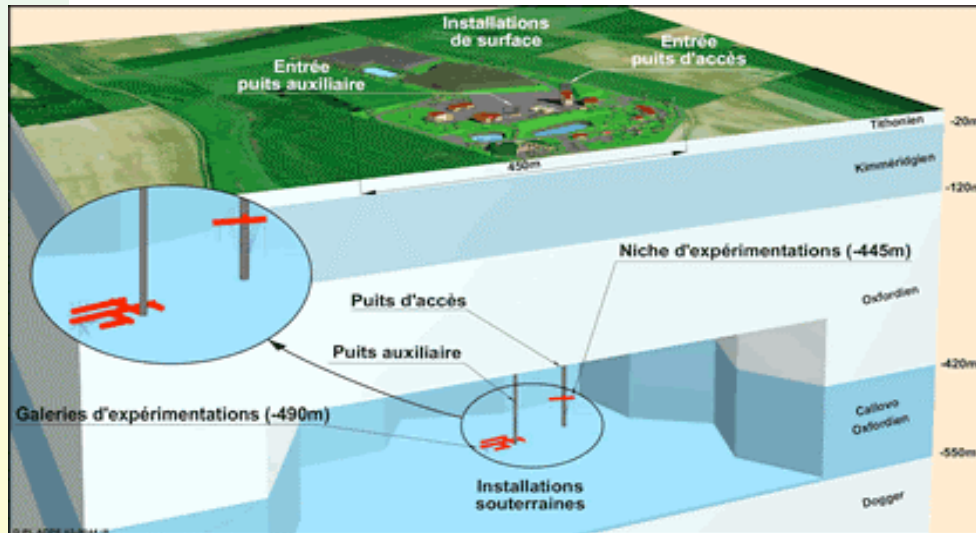
Discuter des ressources ultimes est complexe...

Devenir des déchets (France : 250m³/an)

radiotoxicité $R(t)$ des rejets d'actinides à l'équilibre



- La Loi Bataille (30/12/1991) définissait 3 axes de recherches pour 15 ans :
- Axe 1 : « Séparation/Transmutation »
- Axe 2 : « Stockage géologique profond »
- Axe 3 : « Entreposage longue durée de surface »
- La nouvelle loi de 2006 annonce que ces voies sont « complémentaires »



Des Montagnes de déchets pour des millions d'années?

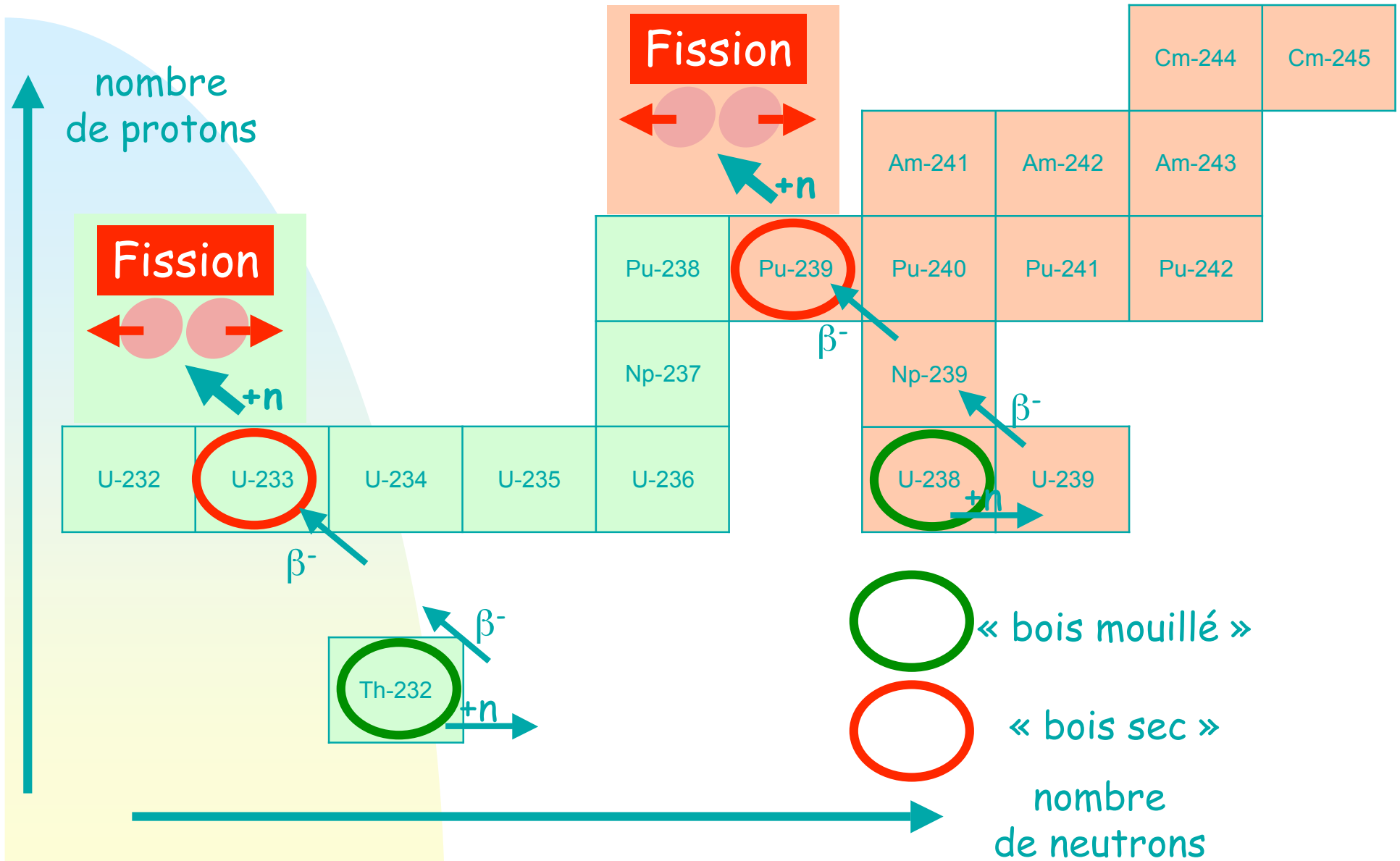
- 1 assemblage
- == 500 Kg U
- == 50 000 T Charbon

- 20t/an/GWe
- * 60 en France = 120T/an
- /360 jours par an
- = 330kg/jour arrivant à La Hague

- ⇒ Pas la peine de chercher des montagnes à La Hague...



Production de déchets : avantage Thorium



Si c'est si bien, pourquoi n'est-il pas DÉJÀ utilisé ?

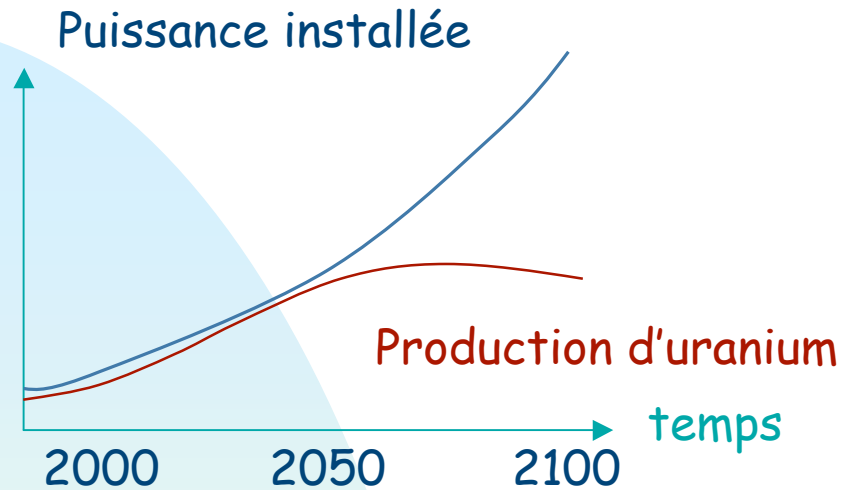
Technologie « Poulidor »

- Pas d' U^{233} dans l'uranium naturel !
- Il faut donc produire du fissile d'abord.
- Le thorium ne peut (doit) être utilisé qu'après le fonctionnement d'autres réacteurs utilisant le cycle U/Pu.

Retraitement, Refabrication

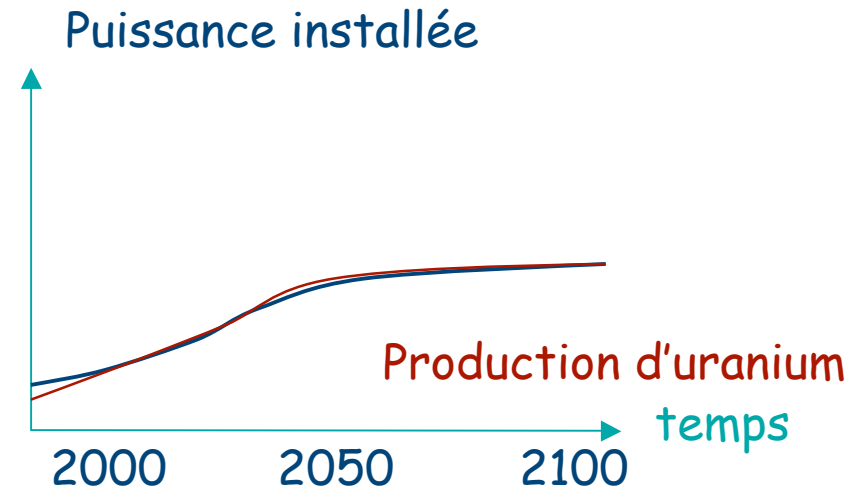
- 10% du prix de l'électricité nucléaire
- Sans utilisation industrielle de combustible Th, pas de capacité de retraitement
- Et réciproquement !
- Historiquement utilisation de procédé « THOREX », chimie aqueuse. Plus difficile que l'équivalente «PURE »"
- Aujourd'hui, mise en avant de la « pyrochimie », à base de sels fondus
- Manipulation difficile à cause de la dose gamma induite par des descendants de l' U^{232}

Quels scénarios étudier ?



régénération

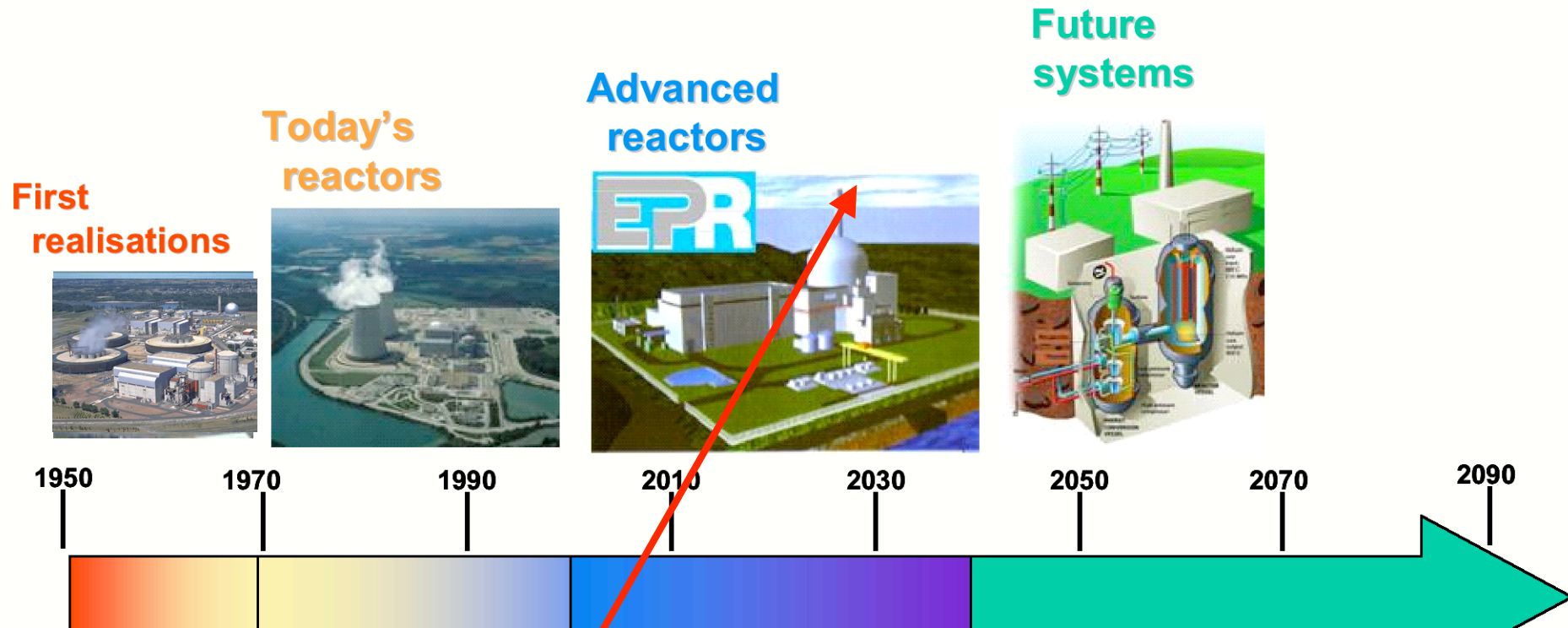
- ⇒ GEN IV (ex : Réacteur à Sel Fondu fonctionnant en cycle Thorium)
- ⇒ Production de la matière **fissile initiale** (>12 Tpu /GWe)
- ⇒ étude de la transition



pas de régénération

- ⇒ Gestion des Déchets (ADS ?)
- ⇒ **Economie de la matière fissile**, en utilisant du Thorium dans des Réacteurs à Eau

Generations of Nuclear Power Systems



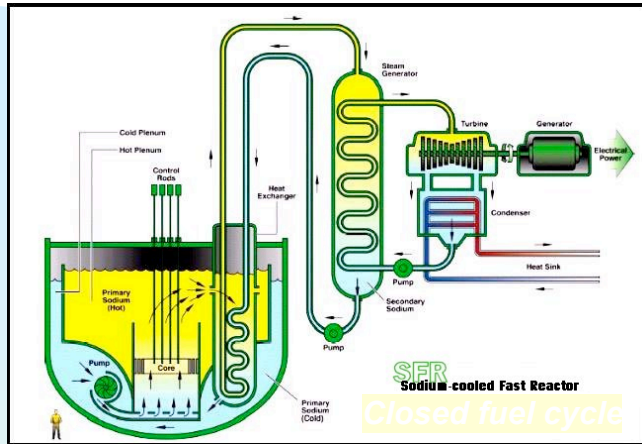
• CNPE Chinon (www.edf.fr)

- 4 REP 900 MWe (« GEN II ») (close to « Châteaux de la Loire »)

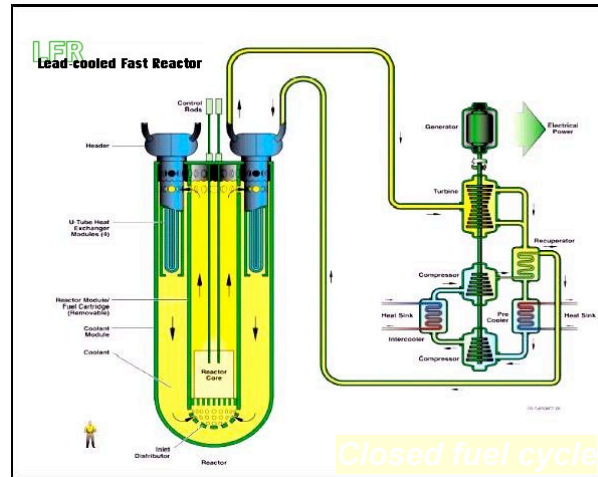
- « la boule » : UNGG 70 MWe prototype (« GEN I »)
1963-1973

Generation IV Forum: selection of 6 nuclear systems

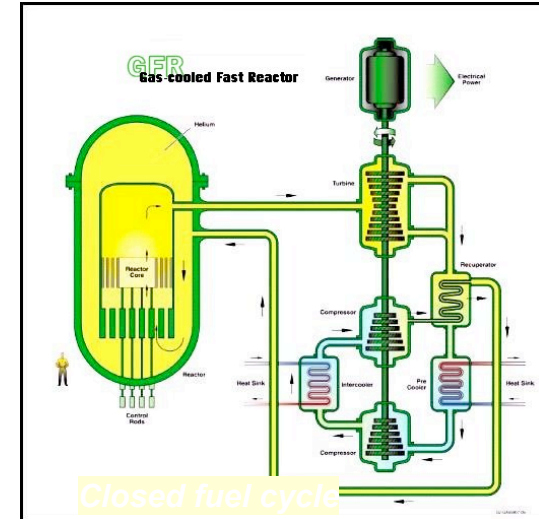
Top-ranking and outsiders ?



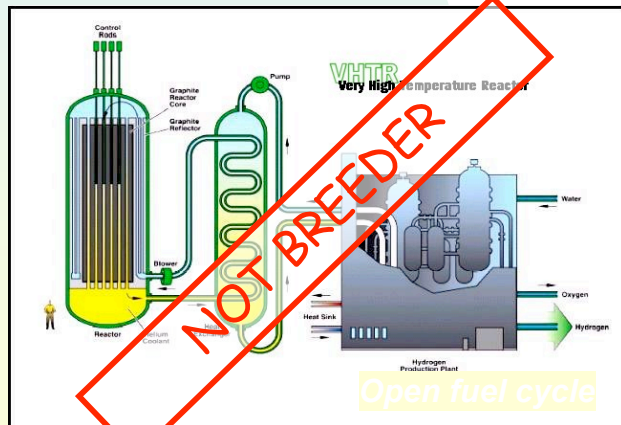
Sodium Fast Reactor



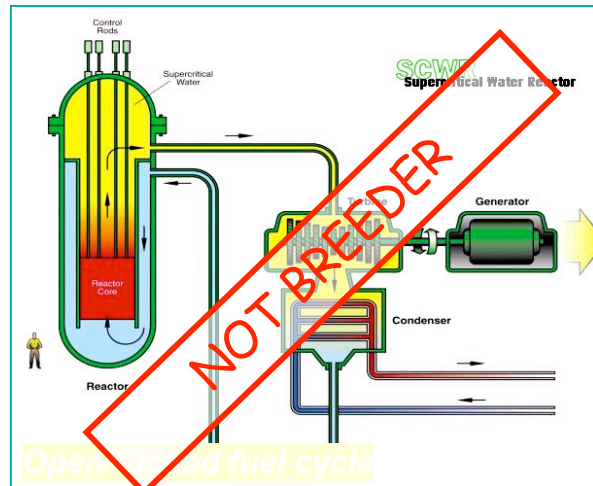
Lead Fast Reactor



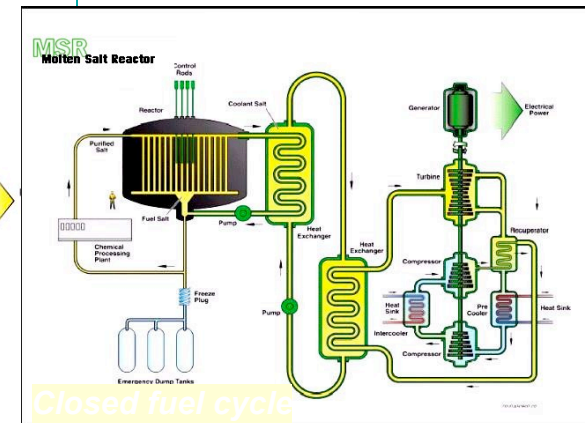
Gas Fast Reactor



Very High Temperature Reactor



Super Critical Water Reactor



Molten Salt Reactor

Did GEN IV existed before GEN II ?



EBR I (1951-1964)
(Experimental
Breeder Reactor)
first nuclear
reactor connected
to the grid !



SuperPhénix (1985-1997)
France has experience of
dismantling a 1200MWe
Sodium breeder reactor
but none for PWR !!!

Communication is **ALWAYS** very oriented when **energy** issue
is involved...

RNR-Na : Cycles U/Pu et Th/U

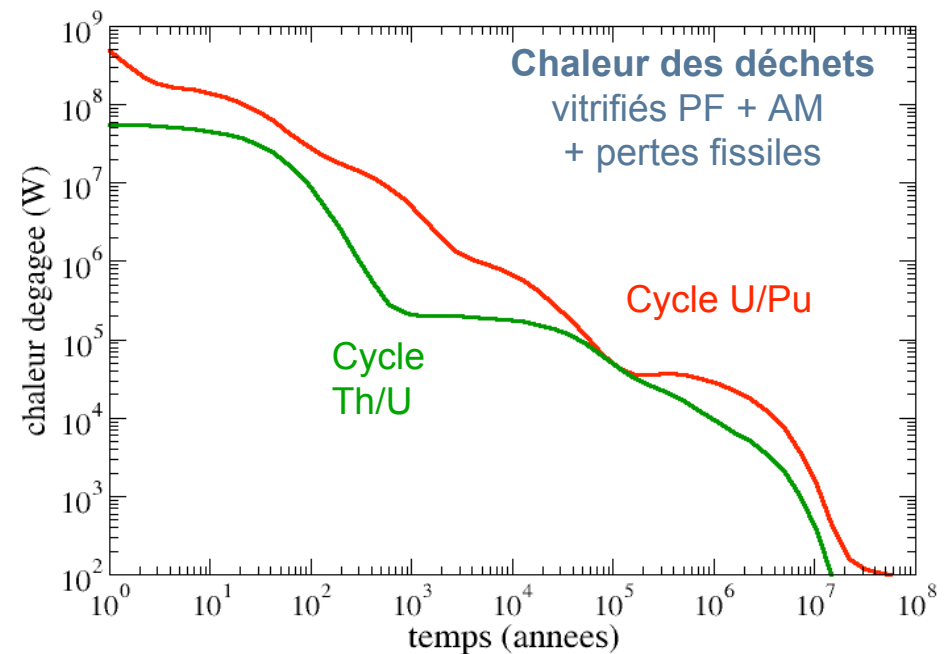
Bilan neutronique plus tendu en Th:
nécessité de couvertures axiales (25cm)
pour atteindre k=1 et iso-génération

Act. Min.	U/Pu kg/(GWe.an)	Th/U kg/(GWe.an)
²³¹ Pa	-	0.28
²³⁷ Np	0.44	0.84
²³⁸ Pu	-	0.23
²⁴¹ Am	2.54	-
²⁴³ Am	2.29	-
²⁴⁴ Cm	0.74	-

Déchets
(sans
transmutation
d'AM)



Configuration	Coefficient de vide (t=0 / t = 5 ans)
U/Pu	1500 / 2300
Th/U	688 / 1146
Th/U + couv. axiales	-707 / + 211
Th/Pu	2100 / 1686



Cycle thorium en RSF

Concept Molten Salt Fast Reactor (MSFR)

Coefficients de sûreté favorables

Combustibles possibles Th/U (équilibre)

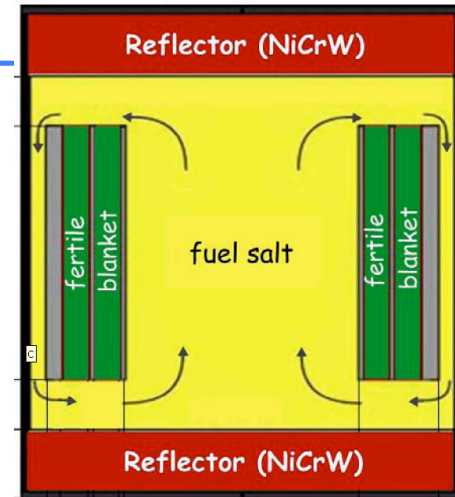
Mais également

Th/Pu+AM : transition directe gen3 → TMSR-NM

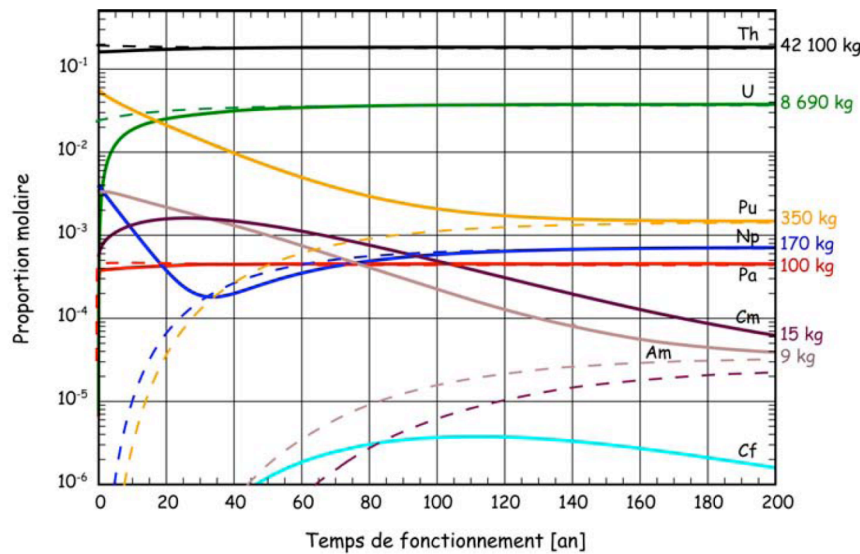
Inventaires au démarrage pour 1 GWe

Th : 37 tonnes

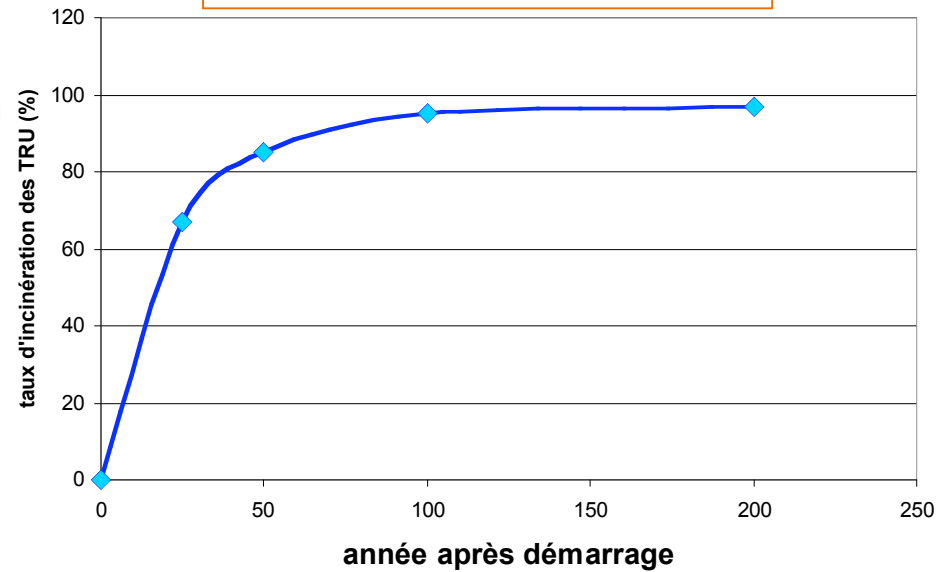
Pu fissile : 8.4 tonnes

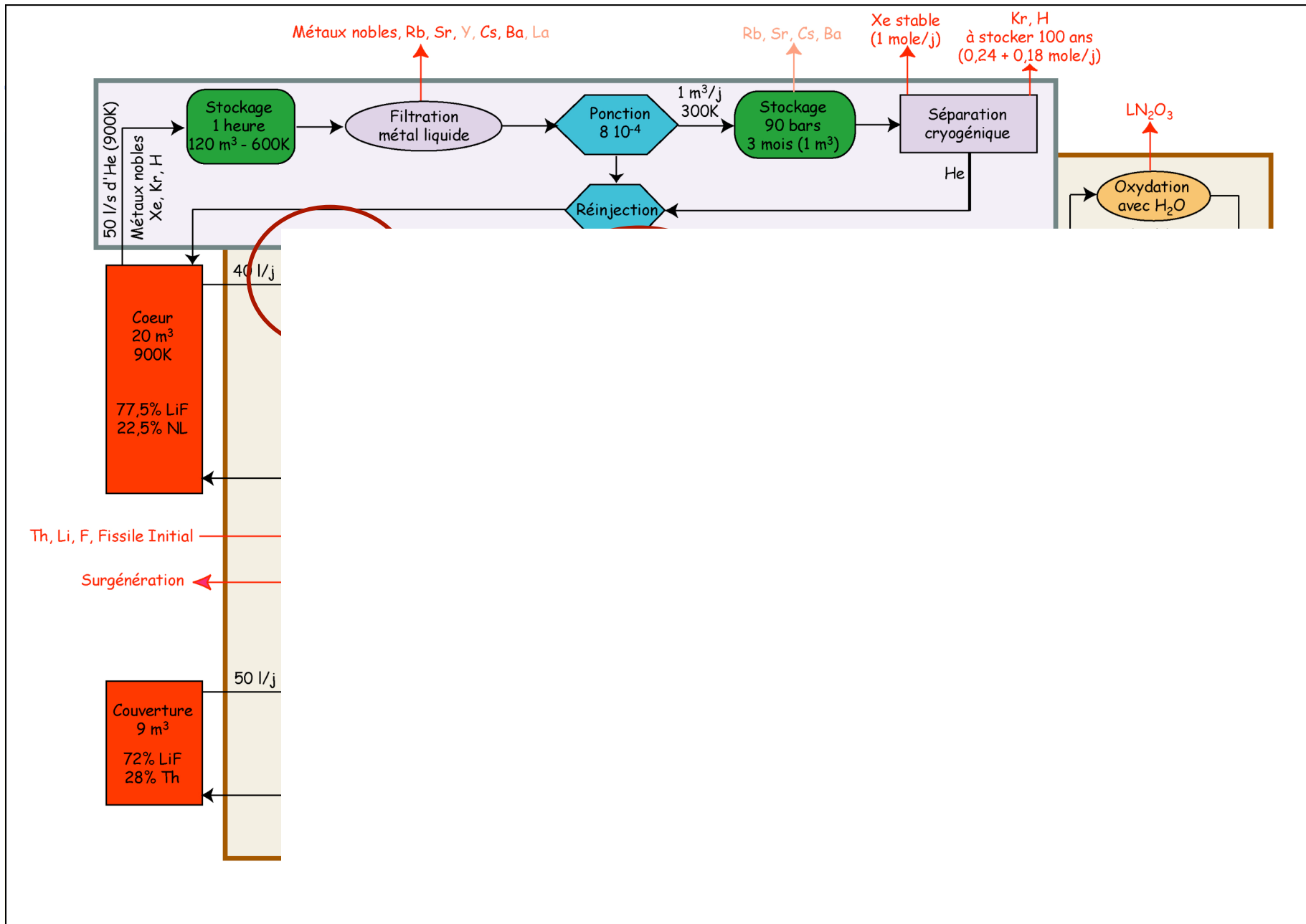


Transition Th/Pu → Th/U



Incinération des TRU issus des Gen3





Cycle thorium en réacteur à eau

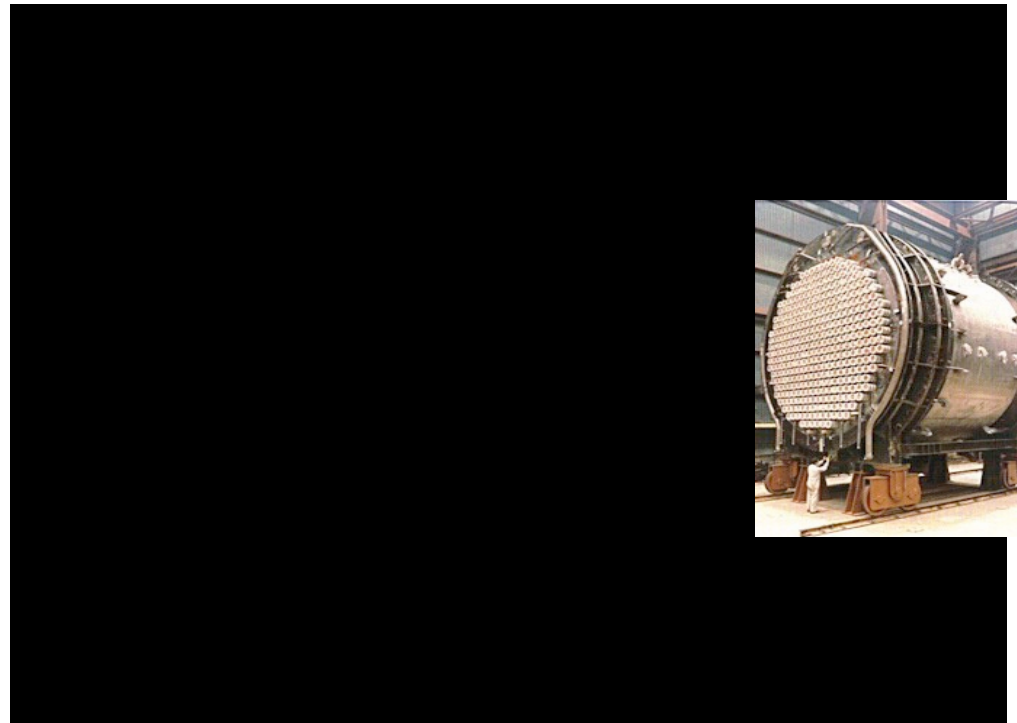
Spécificité du cycle thorium en spectre thermique : régénération théoriquement possible
Mais bilan tendu et empoisonnement rapide du réacteur par les produits de fission (cf RSF)

En mode sous-générateur, les réacteurs au thorium doivent être alimentés en permanence par une source « extérieure » d' ^{233}U

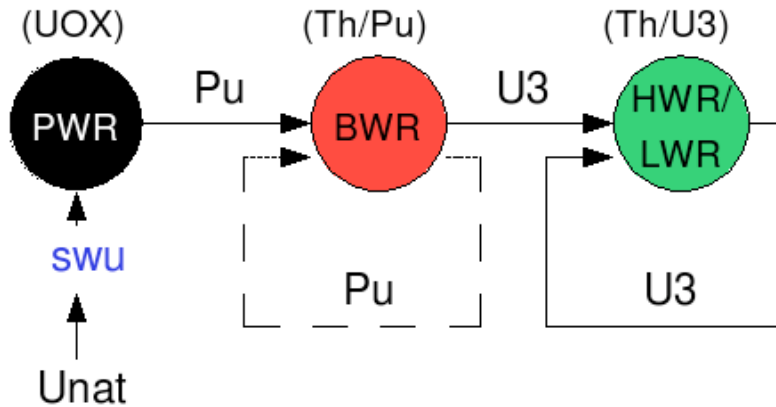
Minimiser les déchets produits signifie augmenter la part du combustible Th/U dans le parc, ie augmenter le taux de régénération des réacteurs au thorium

Dilemme taux de régénération vs temps d'irradiation

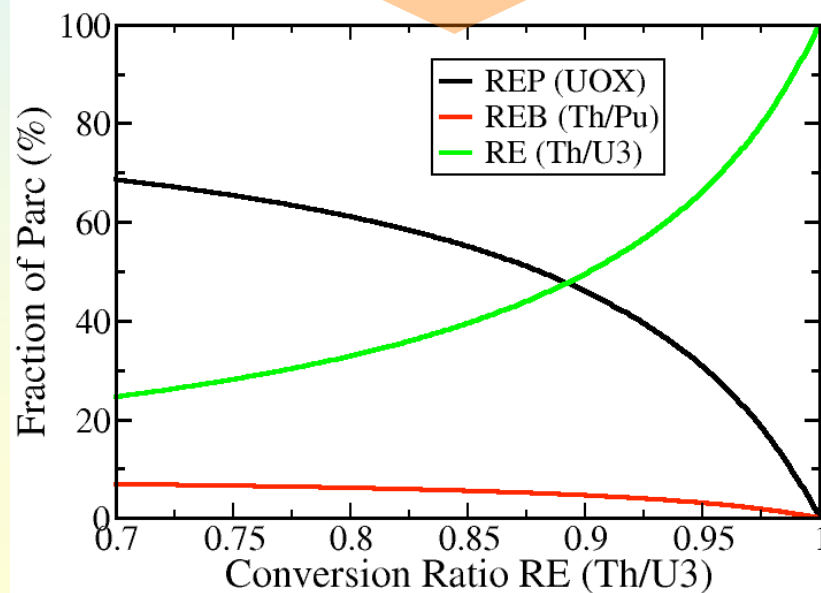
Augmenter le taux de régénération demande à raccourcir le burn-up
→ Augmentation de l'inventaire hors cœur
→ Augmentation des flux retraités, et de la masse d'AM dans les déchets ultimes
→ Optimisation à définir (déchets, inventaires, coût du cycle, ...)



Exemple de parc mixte UOX + Th/Pu + Th/U

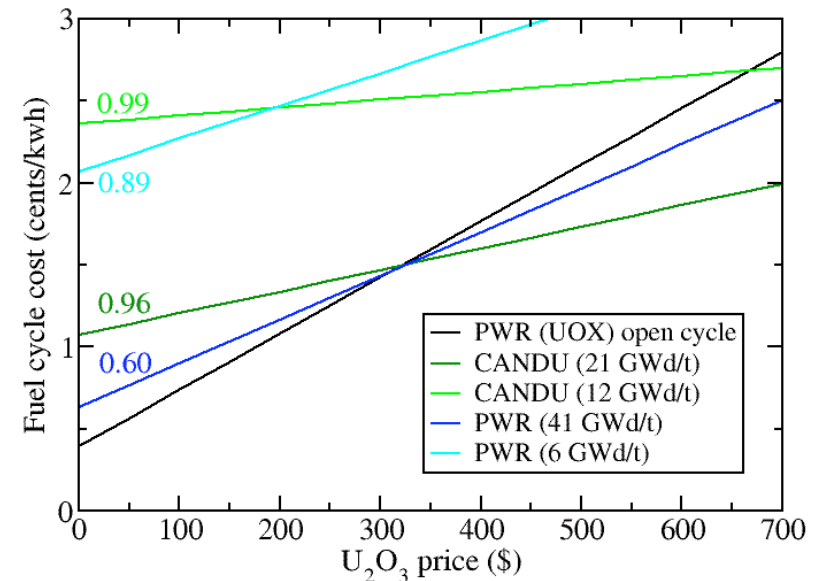


Pour un taux de conversion donné, la proportion entre ces 3 composants est fixée



A. Bidaud

La relation taux de conversion / burn-up permet de définir le coût du cycle en fonction du coût de l'uranium naturel



Les hauts taux de conversion sont pénalisants
Un optimal est à trouver pour chaque technologie envisagée

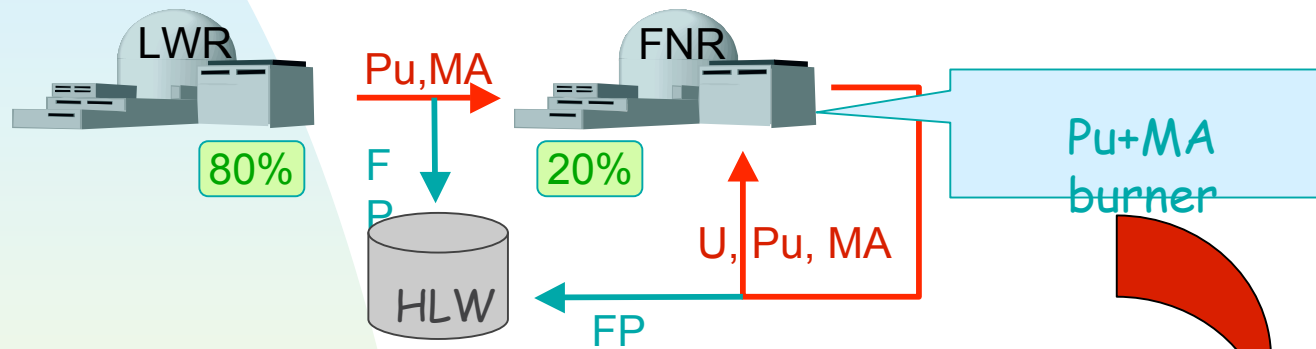
Le cycle thorium permettrait de réduire la consommation d'uranium de façon continue, sans recours à des RNR, et prolonge ainsi l'utilisation des réacteur à eau

Scenario B to Scenario A: symbiotic fleet

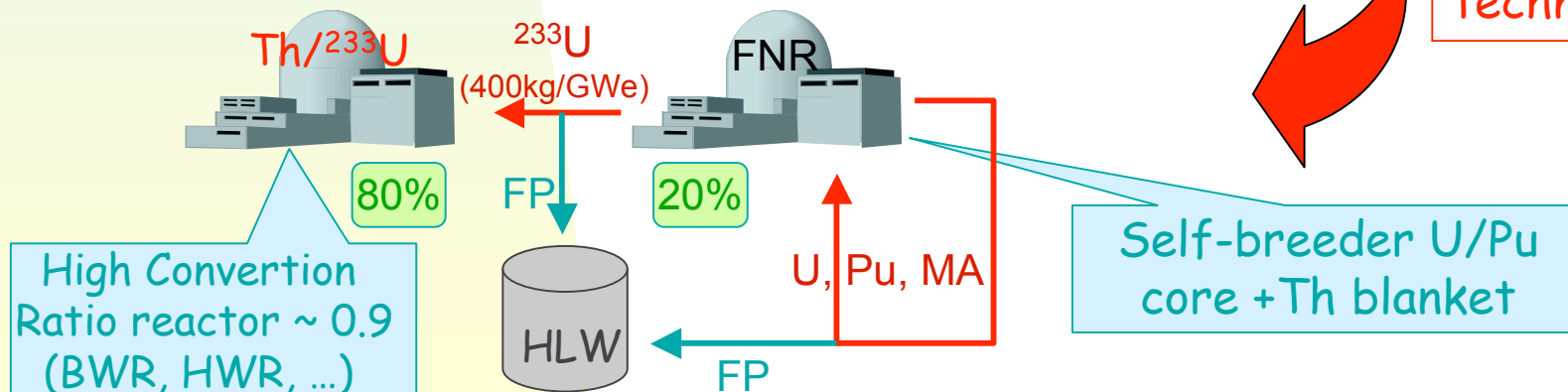
Goal: Pu incineration without forbidding a transition to a breeding fleet in a long time

The role of Thorium in solid fuel

- Stage 1: enough Uranium, No need of breeding



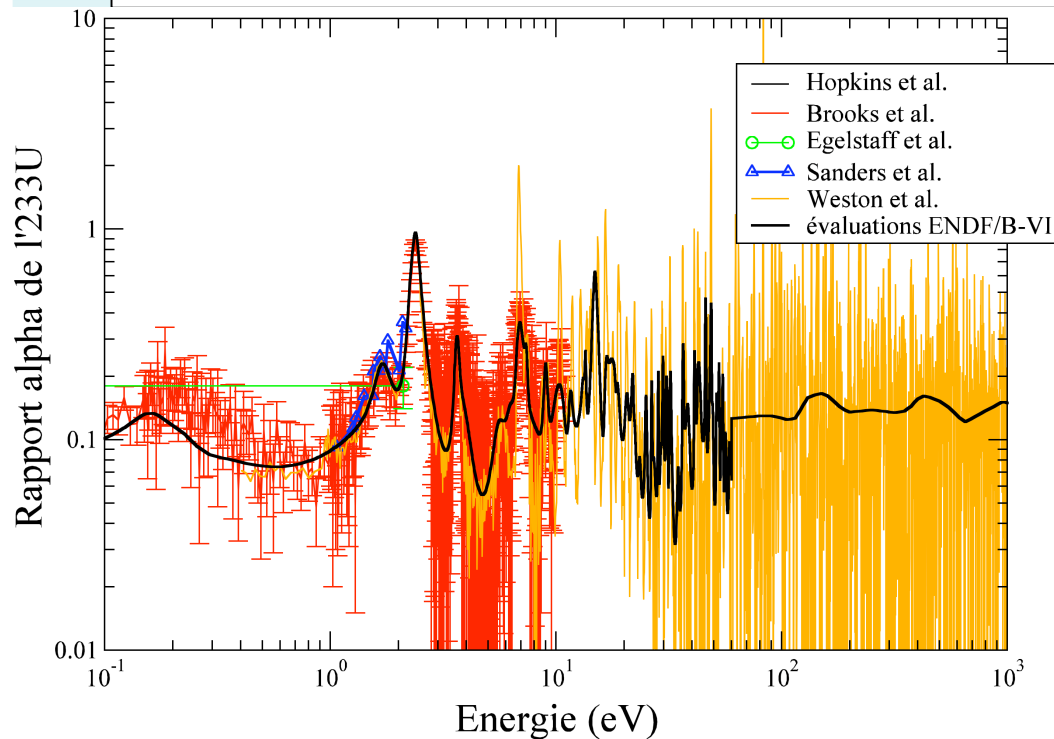
- Stage 2: symbiotic fleet : globally self-breeding



High Conversion Ratio reactor ~ 0.9 (BWR, HWR, ...)

Quels besoins de données nucléaires pour le cycle du Thorium ?

Incertitude sur k_{eff} dominée par les incertitudes sur :
la section efficace et le nombre de neutrons de fission de l' ^{233}U
la section efficace de capture du ^{232}Th



Remarques : Un gros effort de mesure (capture+fission+(n,xn)) et d'évaluation a été produit sur de nombreux noyaux du cycle. En particulier, la nouvelle évaluation du ^{232}Th , basée sur des nouvelles mesures (n-TOF, GELINA) du CEA/DAPNIA a beaucoup amélioré la situation.

Elle contient des **INCERTITUDES !**

Conclusion

- Prévoir le futur (du nucléaire) est très difficile !
- Le cycle du thorium présente de nombreux avantages (utilisation de la ressource, déchets, sûreté...), grâce aux excellentes caractéristiques de son **fissile : l'U233**
- Ses caractéristiques lui donnent une « **souplesse** » qui permettent d'envisager son utilisation dans tous les scénarios, **avec ou sans surgénération**
 - ◆ **C'est un excellent « amortisseur »**
- Il contribue à motiver les recherches « amont » de nombreuses équipes du CNRS :
 - ◆ Données nucléaires
 - ◆ Physique des réacteurs (neutronique, couplage thermohydraulique)
 - ◆ Scénarios
 - ◆ Pyrochimie,
 - ◆ Matériaux
 - ◆

Proliferation issue

- Non proliferation Treaty : only 5 countries have the right to have the bomb
- The other should open their facilities to IAEA inspectors
=> NO one complying the Treaty is suspected to possess bombs : big success !
- Only 3 countries does not signed it (and have the bomb)
:
 - ◆ India, Pakistan, Israel
- Iran does not comply with its obligations
- Are they building bombs ?
- No reactor or facility build for Civil applications and visited by IAEA has been used for proliferation
- Conclusion : help public opinion, make Treaty success known, support IAEA !!!