

Energie Nucléaire

Adrien Bidaud¹

Avec de nombreux emprunts à A. Nuttin, O. Meplan, S. David

¹ Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie (CNRS/UJF/INPG)

bidaud@lpsc.in2p3.fr



A few paradoxes :

1/ The energy of mass.

Does $E=Mc^2$ make electricity ?

2/ A stabilizing energy.

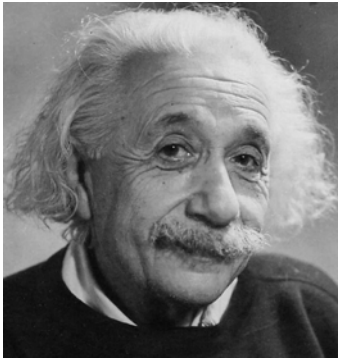
Can the chain reaction produce energy without radioactivity ?

3/ Generation conflict

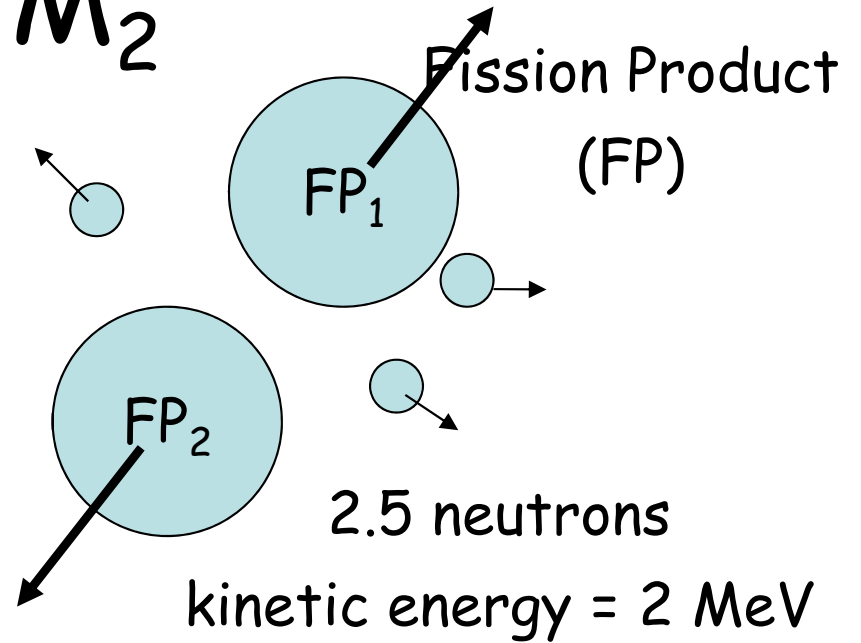
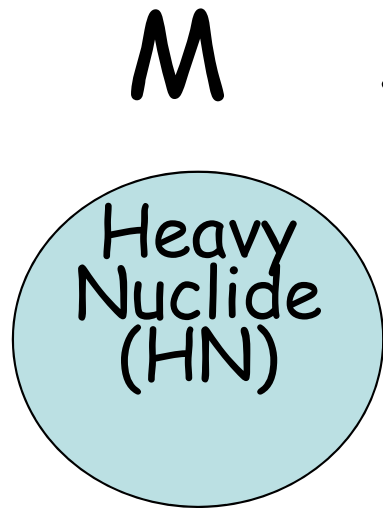
Will the

4/ ITER : the sun on earth ?

Are Nuclear Power Plants powered by $E=Mc^2$?



neutron
meV-MeV

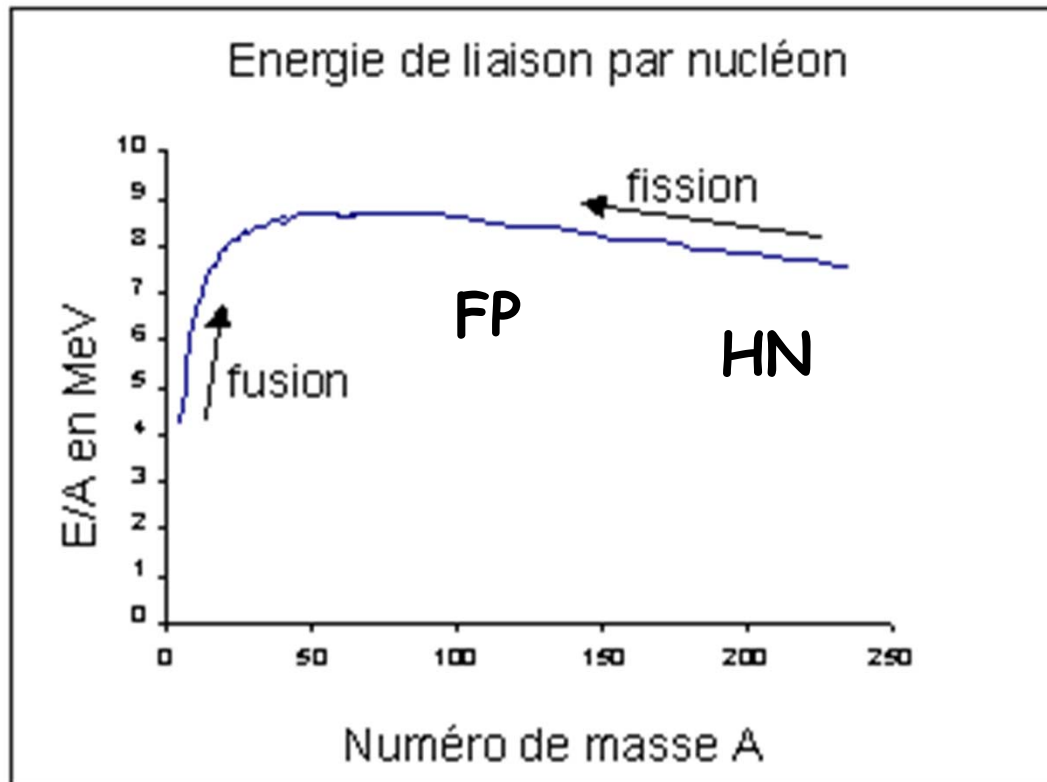


$$\Delta M = 200 \text{ MeV}/c^2$$

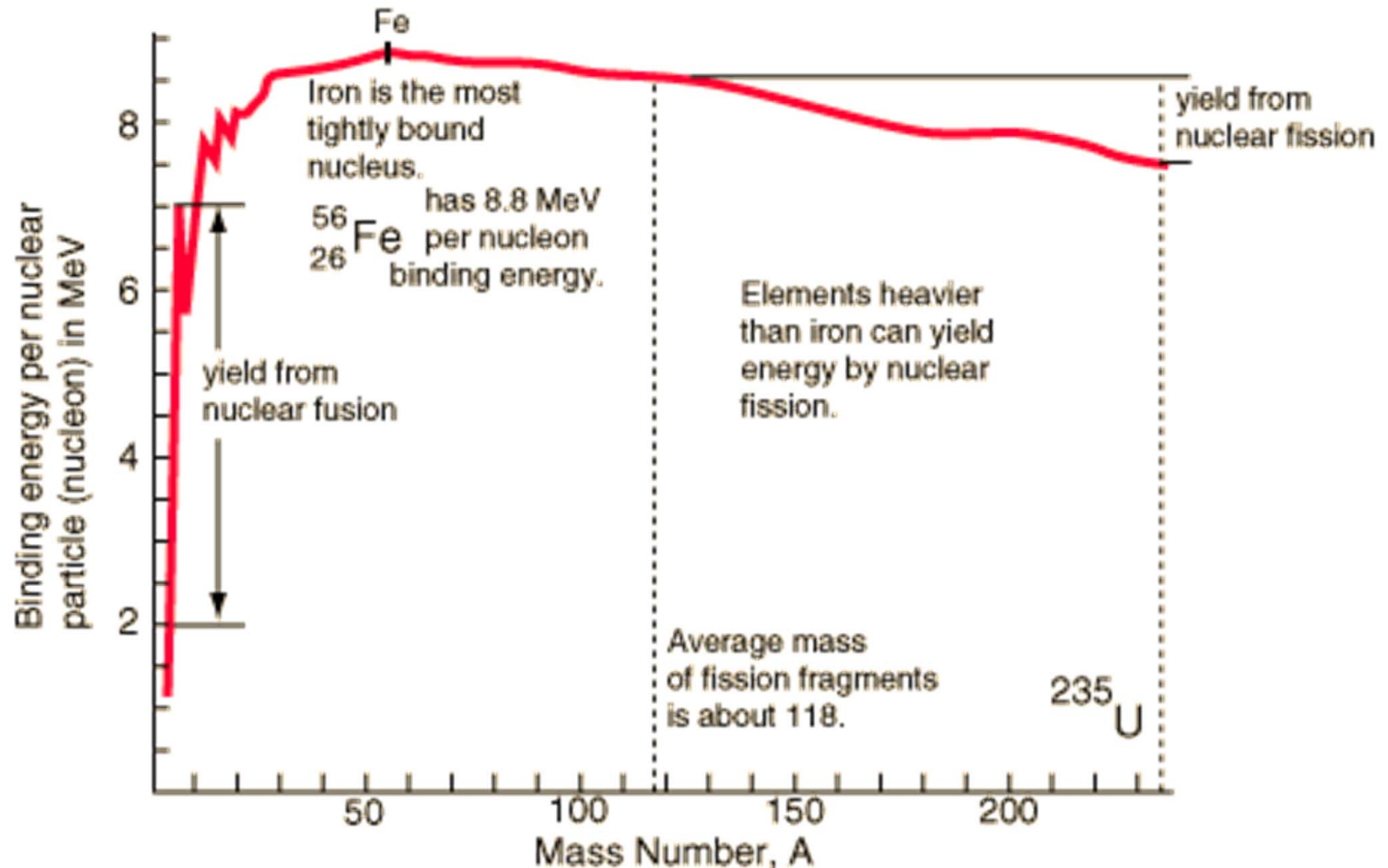
Nuclear energy is extraordinary dense
>10 000 times the binding energy of the electrons with the atoms

But 1/1000 of mass energy ($E=Mc^2$)

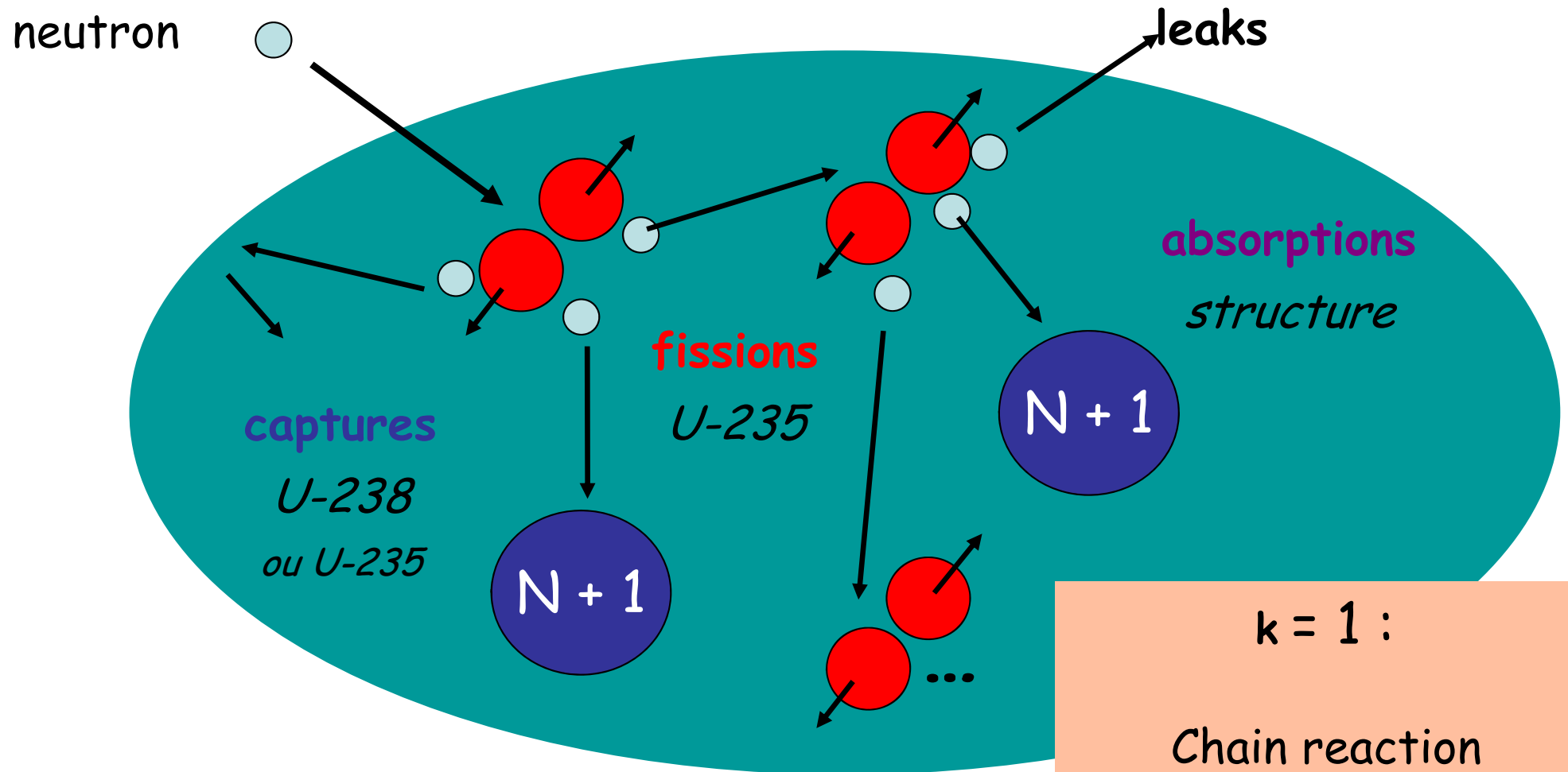
Only part of the *binding energy* is used



Energie de liaison



Chain reaction



$k = 1 :$
Chain reaction
is self-sustained
The reactor is critical

Multiplication factor k

= New fissions induced by each fission

Nuclear reactors are a smart assembly of coolant and fuel with a perfect balance of neutron absorbant materials and fissile materials (= a good « enrichment »)

L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée

Fission

$$\begin{aligned}\text{Energie libérée} &= E_{pF} (165 \text{ MeV}) + \gamma, \beta (30 \text{ MeV}) + E_n (5 \text{ MeV}) \\ &= 200 \text{ MeV} = 200 \cdot 10^6 \times 1.6 \cdot 10^{-19} = 3.2 \cdot 10^{-11} \text{ J}\end{aligned}$$

Gaz naturel

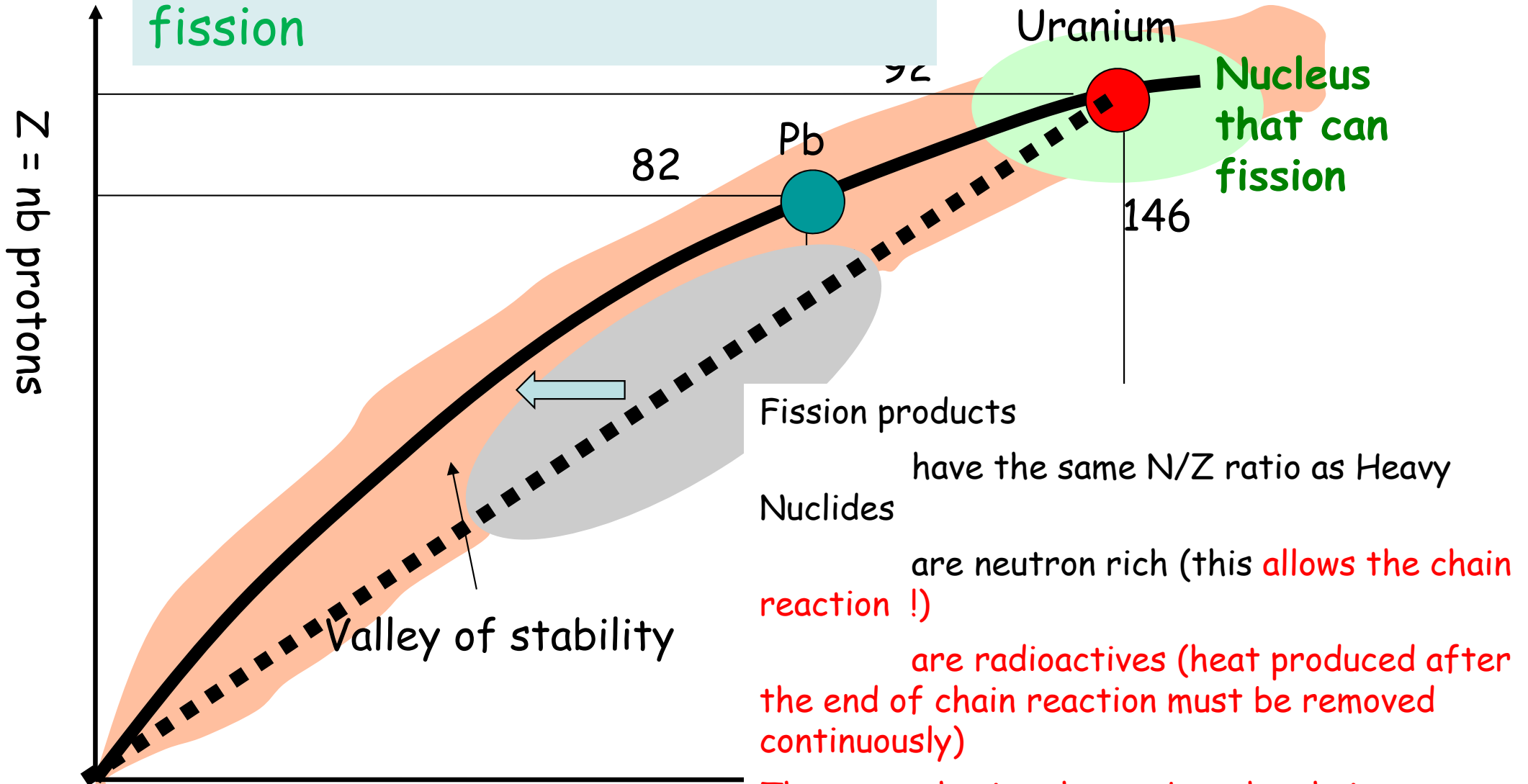


Une personne en France consomme (électricité)
 $\approx 1000 \text{ W} = 9000 \text{ kWh/an} = 32 \text{ GJ}$

- $32 \cdot 10^9 / 3.2 \cdot 10^{-11} = 10^{21}$ fissions = **0.4 gramme**
- $32 \cdot 10^9 / 1.3 \cdot 10^{-18} = 4.1 \cdot 10^{28}$ molécules = **1 tonne**

Can the chain reaction produce energy without radioactivity ?

Mass number is conserved in fission



Fission products have the same N/Z ratio as Heavy Nuclides
are neutron rich (this allows the chain reaction !)
are radioactives (heat produced after the end of chain reaction must be removed continuously)

The same physics that makes the chain reaction possible makes nuclear energy difficult to manipulate

Nuclear Reactor Safety : « in-depth defense »

To protect the **environnement** from radioactivity dangers you need to:

- put barriers** (at least 3) between radioactivity and the environnement (ex : fuel cladding, primary loop, containment dome) Transparency, Safety Culture
- extract decay heat** at all time (with different systems)
- control reactivity** to forbid chain reaction (avoid unstable reactor design, control rods, boron)

You need to control the **operators** with strict laws and have them applied by a **safety authority**, independent Safety Authority

You can improve the safety and social acceptance of nuclear energy by authorising local citizens to participate in the decision making process

Globally, you have to encourage the sharing of a « **safety culture** » Criticality control

Cooling systems

Confinements

Radioactivity

Cadre réglementaire

- **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
- **Loi n°2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs**
 - 3 axes de recherche « complémentaires »
 - ANDRA (dont financement=taxe)
 - Financement du démantèlement

Loi Transparence et Sureté Nucléaire (TSN)

Article 2.II

En application du principe de participation et du principe pollueur-payeur, les personnes exerçant des activités nucléaires doivent en particulier respecter les règles suivantes :

- 1 Toute personne a le droit, dans les conditions définies par la présente loi et les décrets pris pour son application, d'être informée sur les risques liés aux activités nucléaires et leur impact sur la santé et la sécurité des personnes ainsi que sur l'environnement, et sur les rejets d'effluents des installations ;
- 2 Les responsables de ces activités supportent le coût des mesures de prévention, et notamment d'analyses, ainsi que des mesures de réduction des risques et des rejets d'effluents que prescrit l'autorité administrative en application de la présente loi.

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.

Le mythe du mensonge du nuage de Tchernobyl



TCHERNOBYL: LE CHOC DU NUAGE

Pierre Pellerin, le directeur du service central de protection contre les radiations ionisantes (SCPRI) a annoncé hier que l'augmentation de radioactivité était enregistrée sur l'ensemble du territoire, sans aucun danger pour la santé.

Vendredi 2 Mai 1986

« TCHERNOBYL : LE CHOC DU NUAGE »

Pierre Pellerin, le Directeur du Service Central de Protection contre les radiations ionisantes (SCPRI) a annoncé hier que l'augmentation de radioactivité était enregistrée sur l'ensemble du territoire, sans aucun danger pour la santé



LE MENSONGE RADIOACTIF

Le nuage radioactif de Tchernobyl a bien survolé une partie de l'Hexagone

Les pouvoirs publics en France ont menti, le nuage radioactif de Tchernobyl a bien survolé une partie de l'Hexagone : le professeur Pellerin en a fait l'aveu deux semaines après l'accident nucléaire.

Lundi 12 Mai 1986

« LE MENSONGE RADIOACTIF »

Les pouvoirs publics en France ont menti : le nuage radioactif de Tchernobyl a bien survolé une partie de l'Hexagone : le professeur Pellerin en a fait l'aveu deux semaines après l'accident nucléaire



Combien de nucléaire en France, Mr Sarkozy ?

Heum, heu... 50% de l'électricité Mme Royal

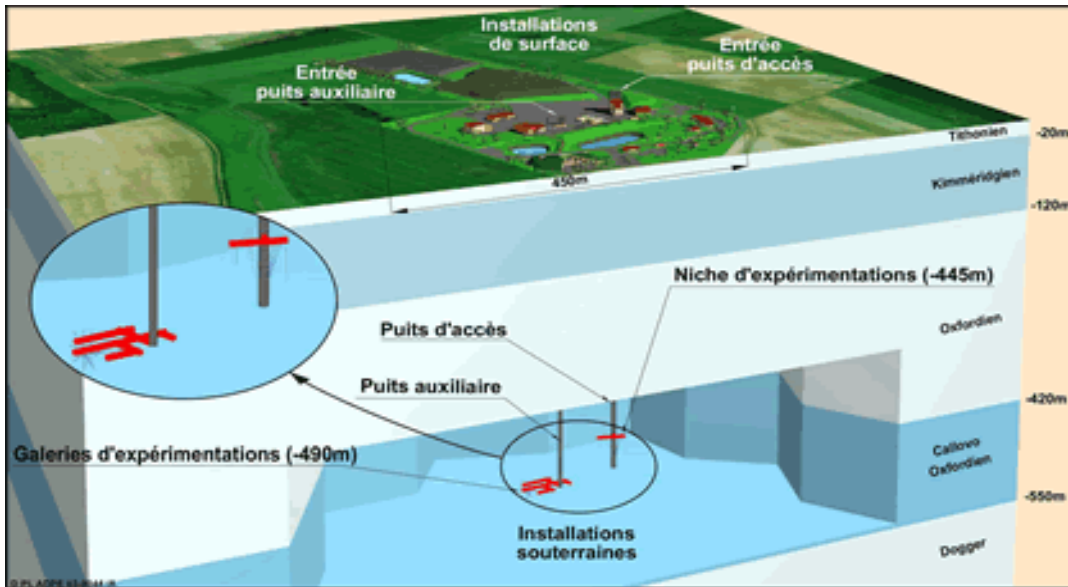
Non !! 17 % !!

Heu non pas 17%, mais en tout cas il faut lancer la génération 4, l'EPR !

Mais l'EPR c'est génération 3 !

Mais il vaudrait mieux la 4^{ème} génération, car le combustible, c'est les déchets d'aujourd'hui !!

Waste management



Underground final repositories will be dug in very stable geological grounds

Medium Activity and High Activity wastes are expected to be stored for million years without noticeable increase of radioactivity on the surface

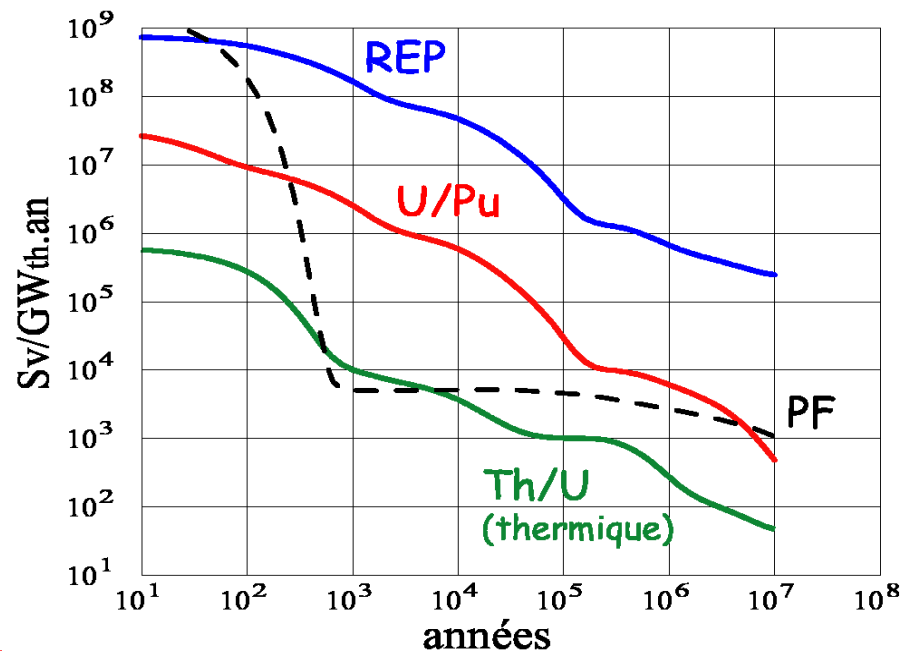
Partitioning and transmutation can be used to reduce the activity and heat of wastes sent to final repository

If Plutonium is used in reactors and recycled, the activity is decreased by more than a factor 10

If Thorium is used, another factor 10 could be achieved

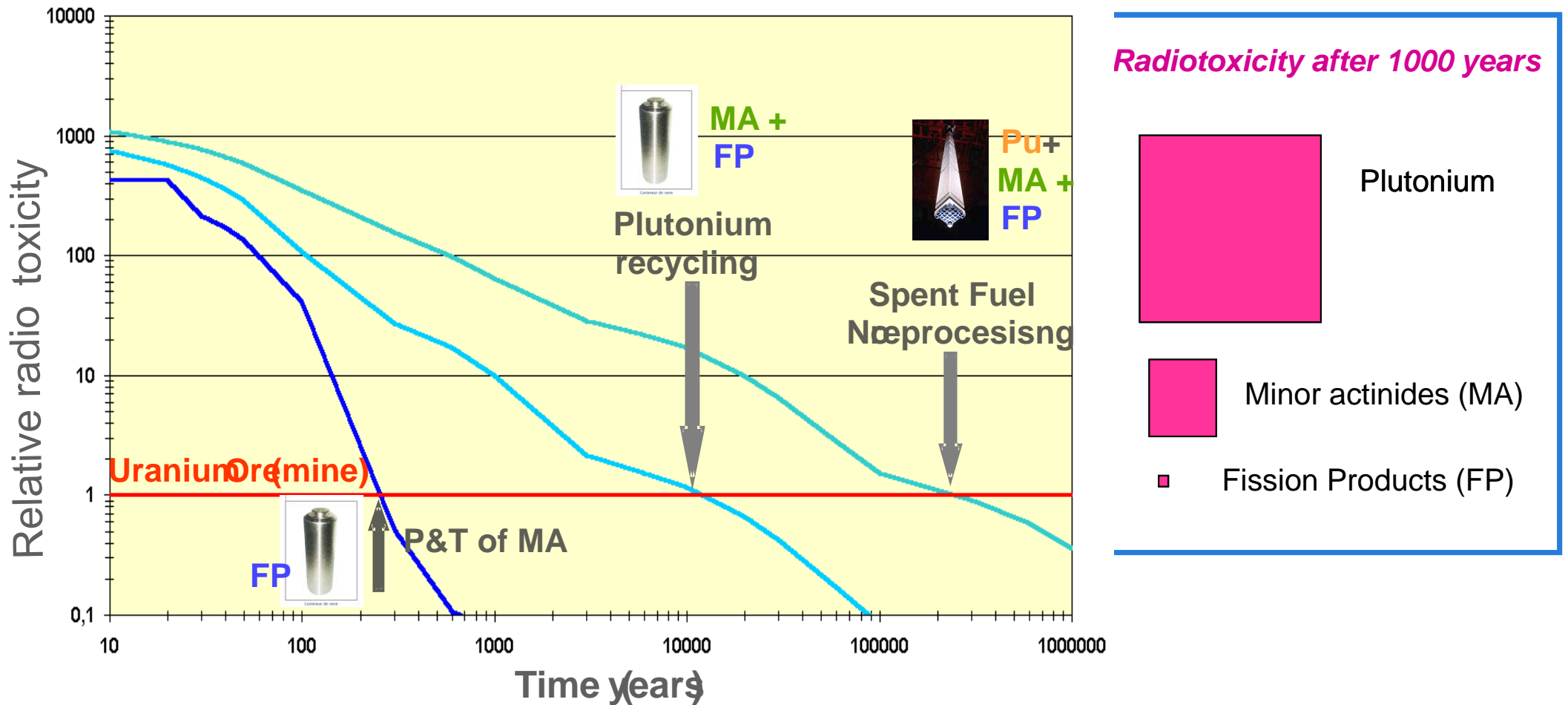
The solutions for waste management will be country specific and history specific

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



Réduction des déchets par recyclage des actinides

- La radiotoxicité à long terme est dominée par le Plutonium
- Ce plutonium est majoritairement FISSILE et donc « facilement » réutilisable



Resources consumption

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)

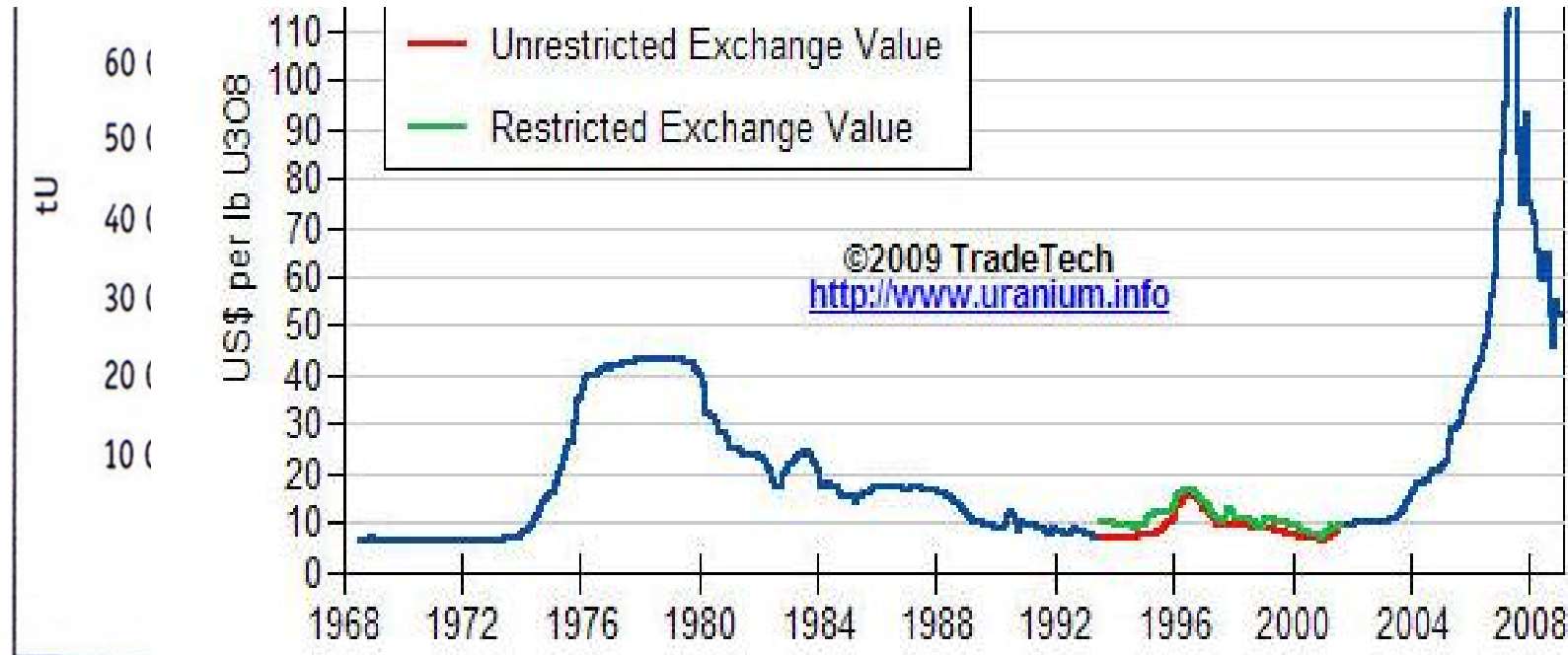
200 - 400 years

- scenario « nuclear x 8 »

≈ 50 - 100 years

& optimizations of U nat use in LWR

16)

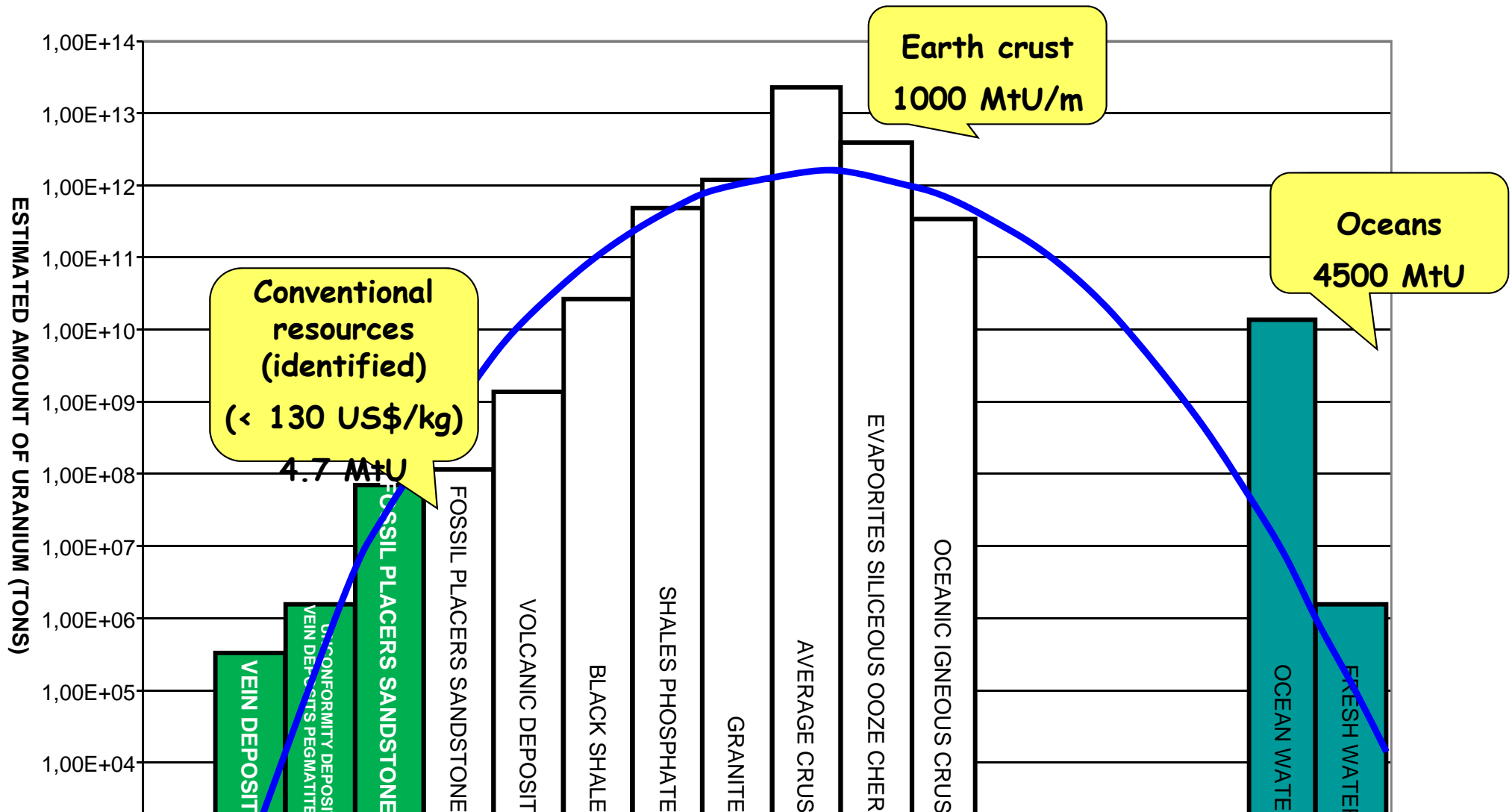


Imbalance between uranium consumption and extraction

→ Should we get prepared to an « uranium peak » ?

What is the definition of the resources ?

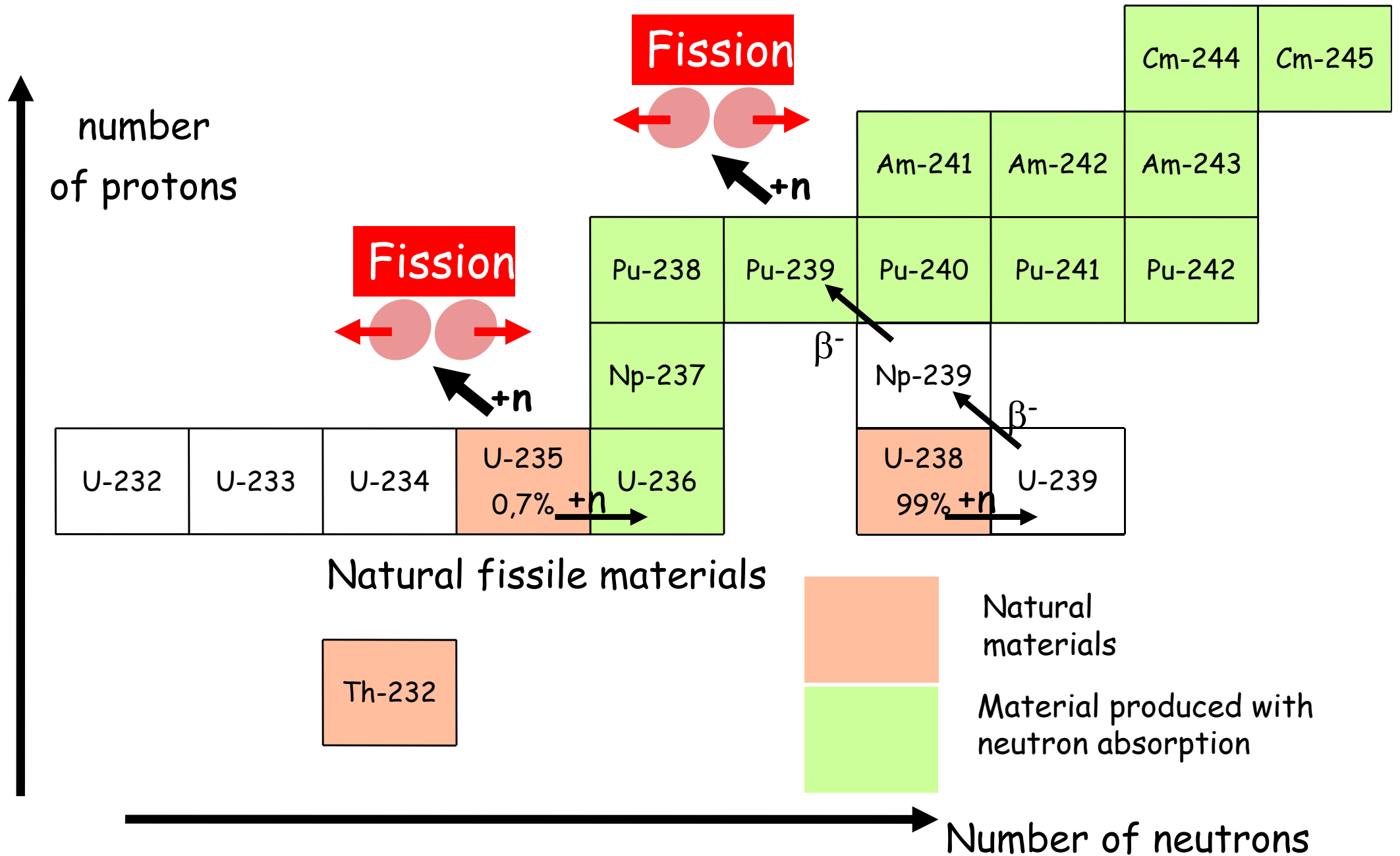
URANIUM RESOURCES



The lower the grade, the higher to cost of extraction, the more resources exists

There will always be uranium. At what cost ?

Breeding fissile materials



Did GEN IV existed before GEN II ?



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

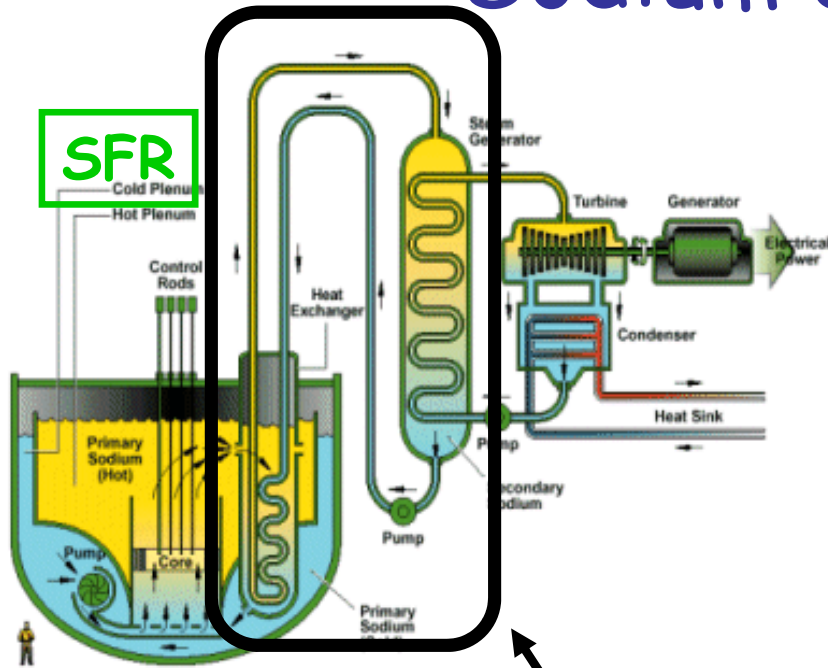
SuperPhenix (1985-1997)

France has more
expericence with
dismantling a 1200MWe
Sodium breeder reactor
than DWD III



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

Sodium cooled Fast Reactor



Fast Spectrum

Coolant: Na

- Very good coolant (& cheap)
- Low pressure
- Industrial experience

but

- Chemically reactions with air/water
- Need extra coolant system to separate radioactive sodium from (water) steam generators → extra costs

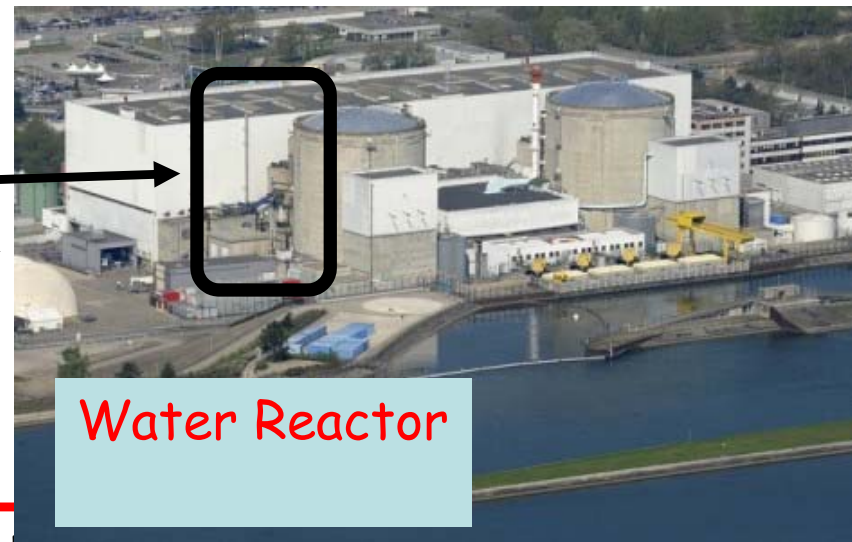
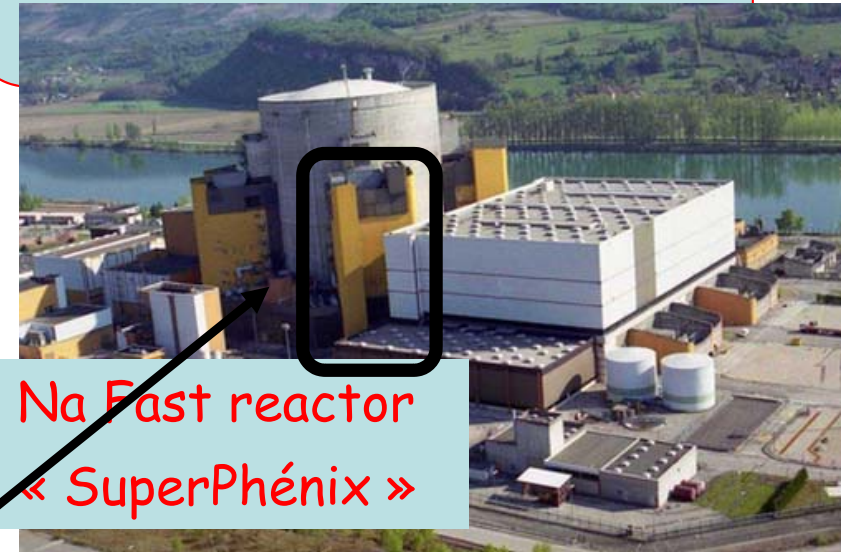
Temperature: 550°C

Closed fuel cycle

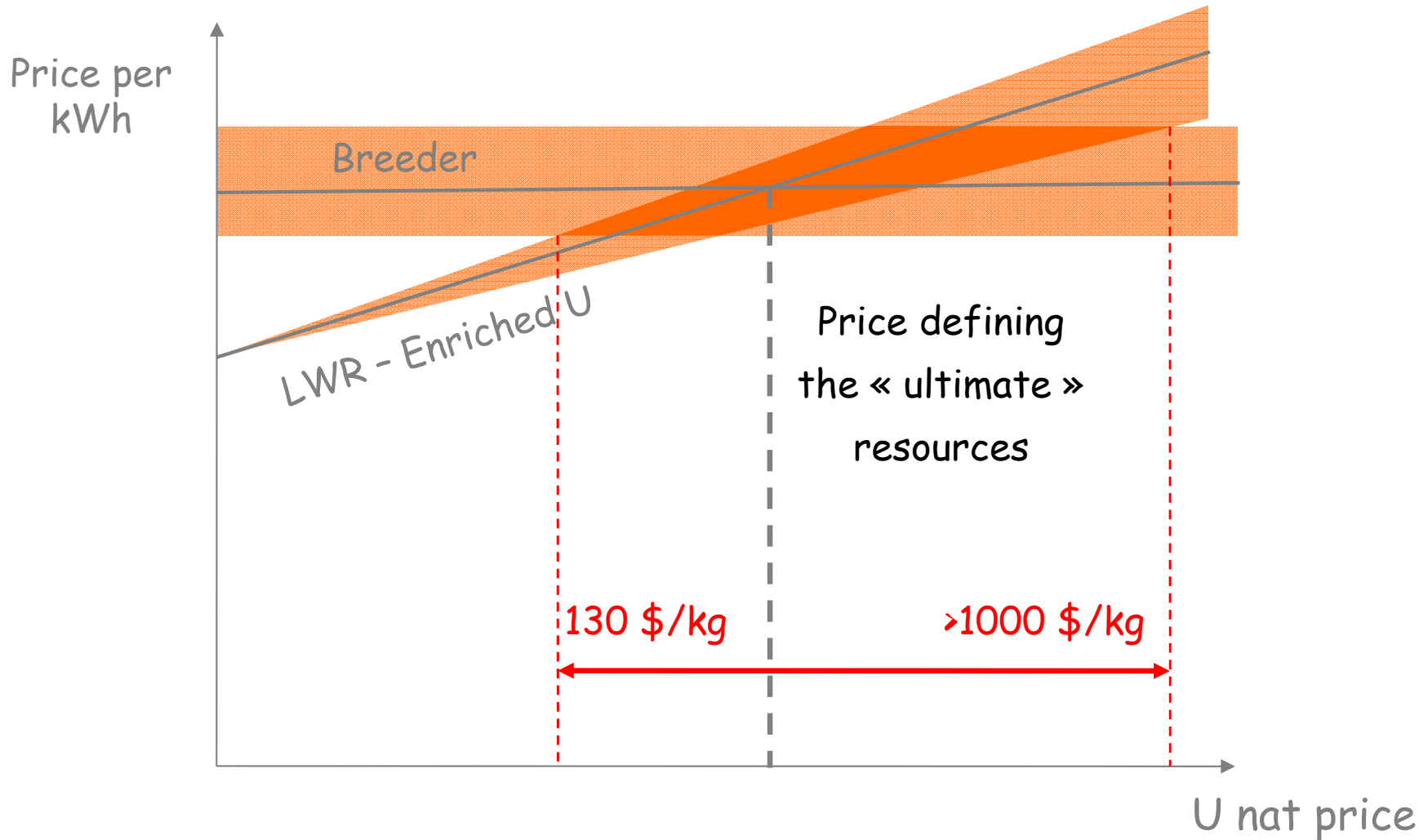
R&D

(passive) Safety

Design simplification (cost)



Breeding & resources



130\$/kg used to be the highest price of uranium for reported resources !

130\$/kg is already the spot price today !

Are we at the end of known resources ?

Breeding & resources (2)

The discussion about resources is complicated

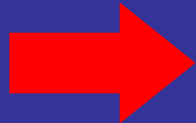


Interdisciplinary research shows that Breeder reactors have to be competitive to coal not to other nuclear reactors

This approach is much too simplified !

The dynamics of future GEN nuclear reactor will be dependant on

- ❑ Availability of local alternatives (ex : coal, hydro...)
- ❑ Availability of fissile materials : nuclear history GEN IV reactor need no Natural uranium feed but still need a critical mass to start !

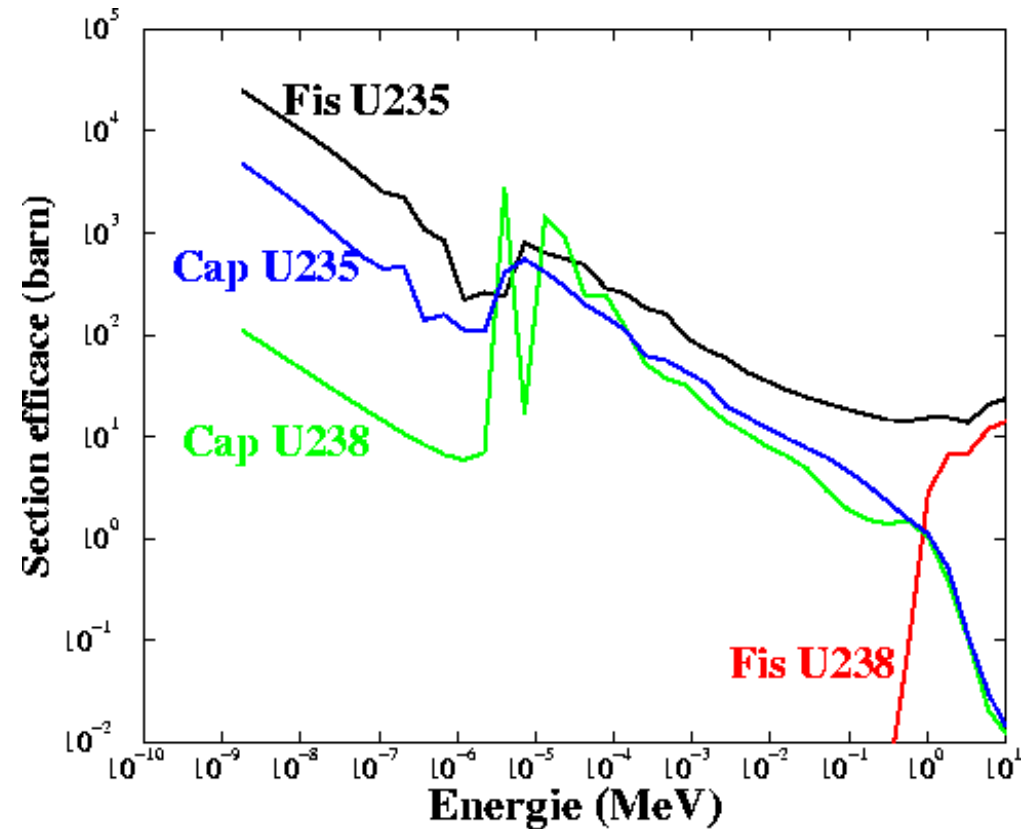
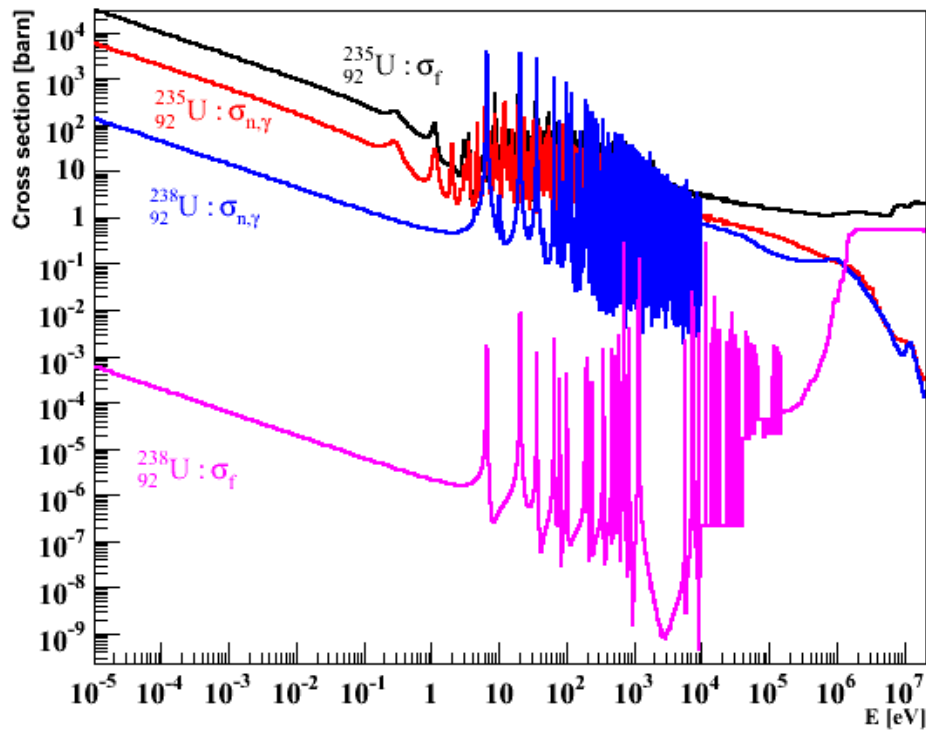


The possible development of breeders (if any) will be country specific...

Sections efficaces

- de fission
- de capture (ex: $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U}$)
- de diffusion (ralentissement des neutrons)

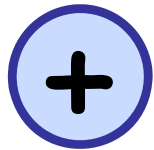
• Lissage des résonances



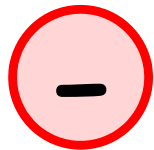
La régénération

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

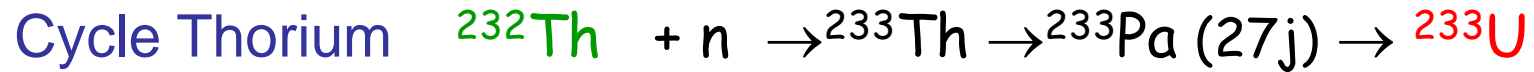
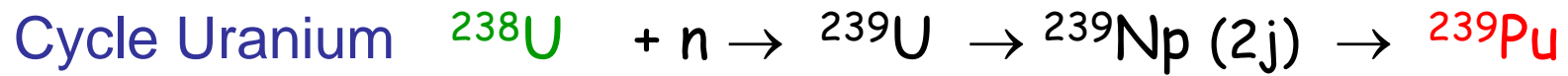
$\nu - 2 (1 + \alpha) > 0 \Rightarrow$ régénération possible

$< 0 \Rightarrow$ régénération impossible

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

→ Caractéristiques du noyau fissile uniquement

La régénération

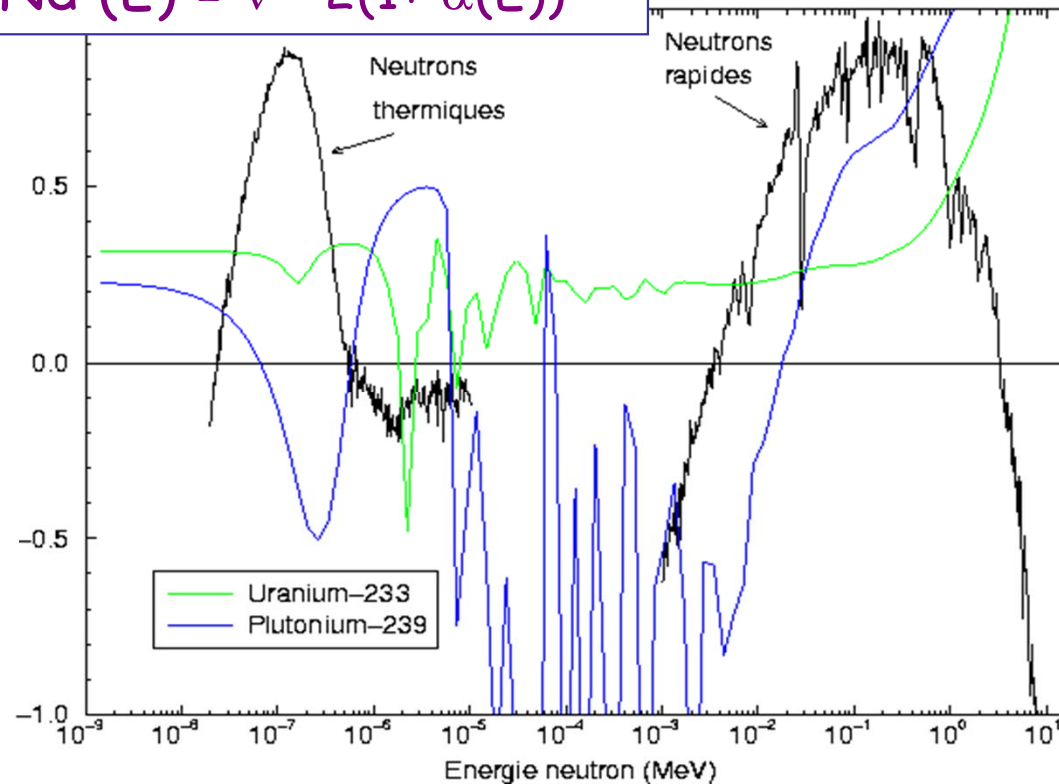


Spectre thermique

Th/U Nd > 0

U/Pu Nd < 0

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

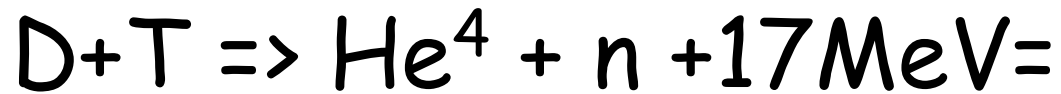


Spectre rapide

Th/U Nd > 0

U/Pu Nd > 0

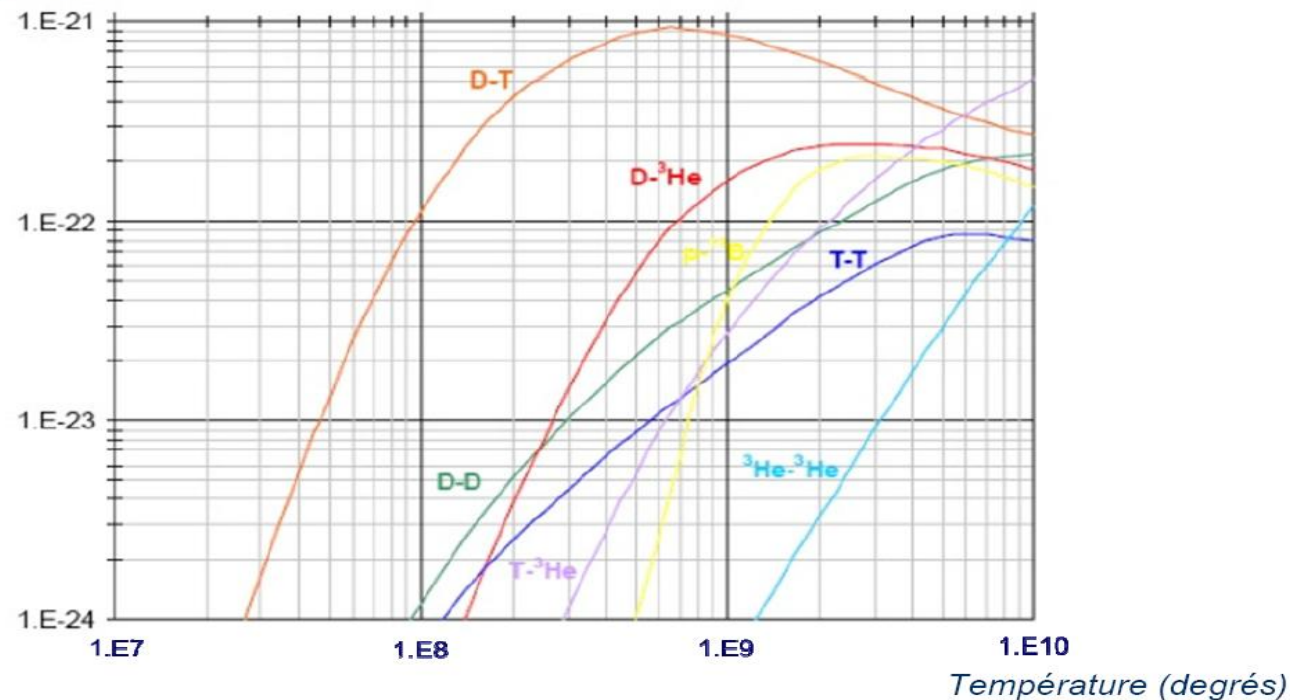
ITER : The Sun on Earth ?



D et T portent 1 charge électrique !

==> réaction à seuil !

Réactivité (m^3/s)



deutérium-tritium
 $T_{DT} \approx 150$ millions de degrés

deutérium-deutérium
 $T_{DD} \approx 1,5$ milliard de degrés

ITER : The Sun on Earth ?

Contraintes :

Extraction de chaleur

Resistance aux neutrons

Bobines supra

Regeneration du T...

Schéma d'un réacteur de fusion D-T

