

Maitriser l'Energie de l'Atome

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.

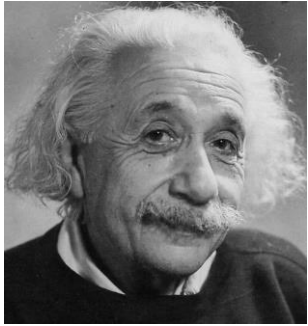
Can the chain reaction produce energy without radioactivity ?

3/ Generation conflict

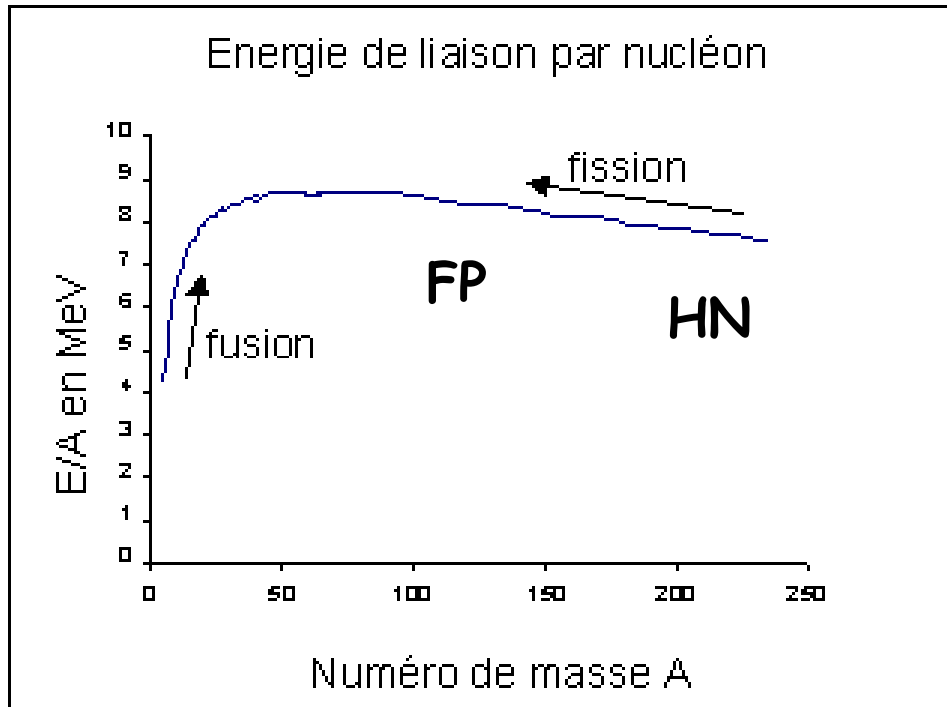
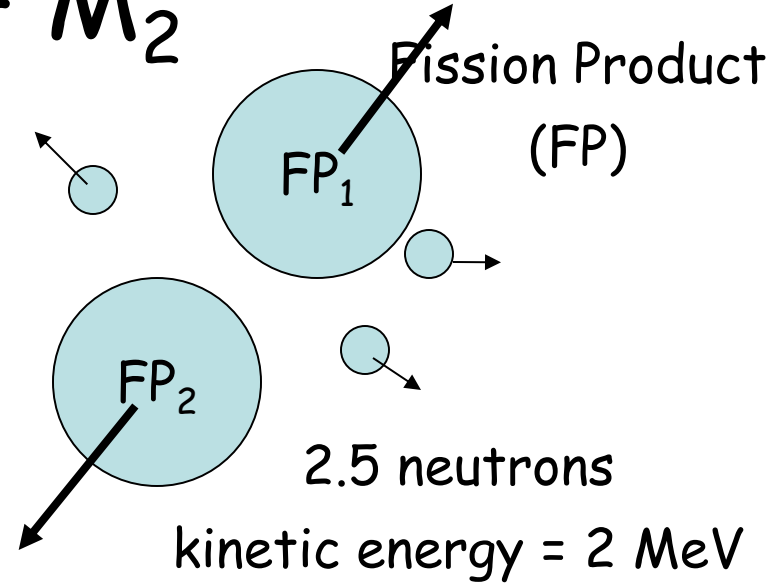
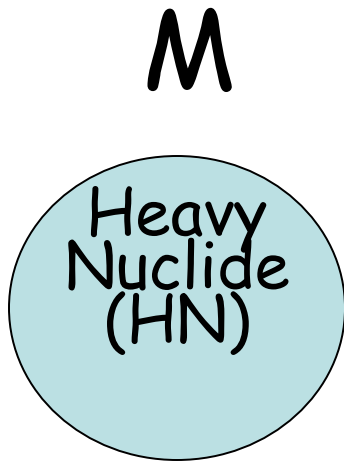
Will the next generation of reactor kills the old one ?

4/ ITER : the sun on earth ?

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



neutron
meV-MeV



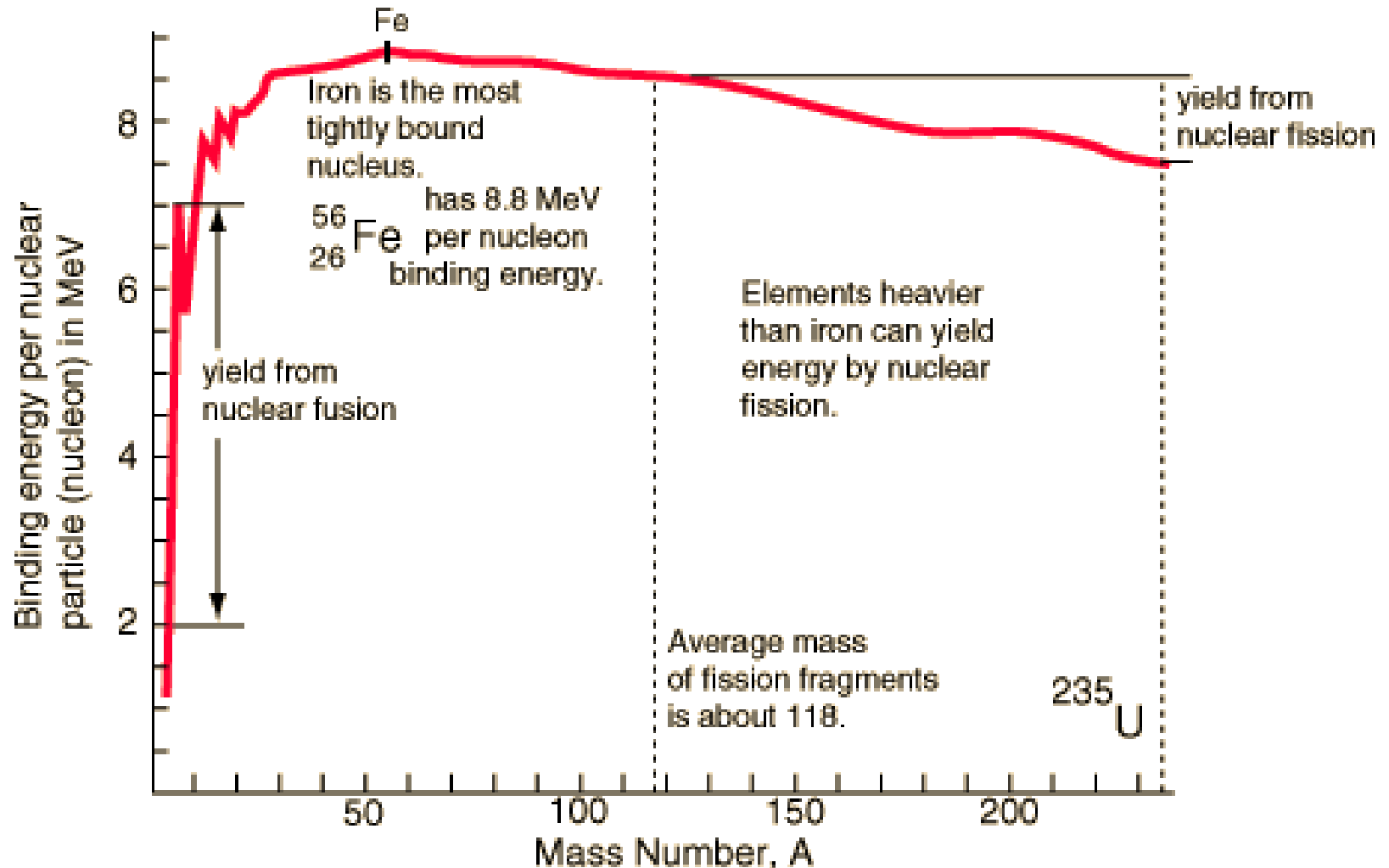
$$\Delta M = 200 \text{ MeV}/c^2$$

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

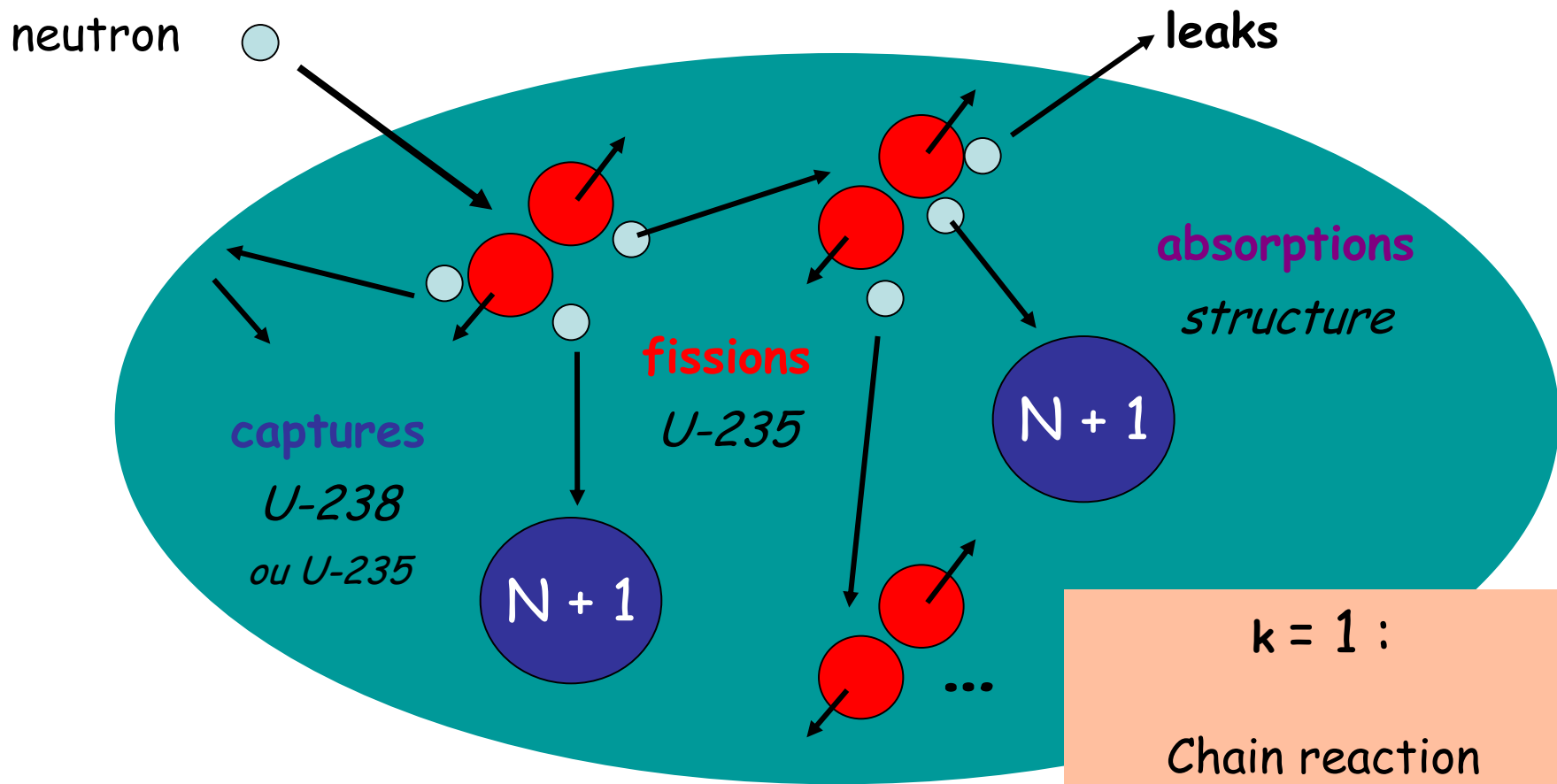
But 1/1000 of mass energy ($E=Mc^2$)

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

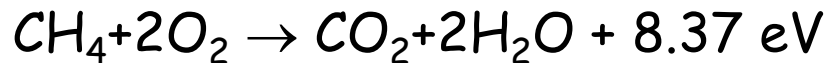
Nuclear reactors are a smart assembly of coolant and fuel with a perfect balance of neutron absorbant materials and fissile materials (= a good « enrichment »)

L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée

Fission

$$\begin{aligned} \text{Energie libérée} &= E_{pF} (165 \text{ MeV}) + \gamma, \beta (30 \text{ MeV}) + E_n (5 \text{ MeV}) \\ &= \mathbf{200 \text{ MeV}} \end{aligned}$$

Gaz naturel



Une Français consomme en moyenne (électricité) $\approx 1000 \text{ W}$

Quelle masse d'Uranium faut-il fissionner (de méthane faut il bruler) pour alimenter chaque français en électricité ?

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

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

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

$6 \cdot 10^{23}$ atomes d'U235 pèsent environ 235g

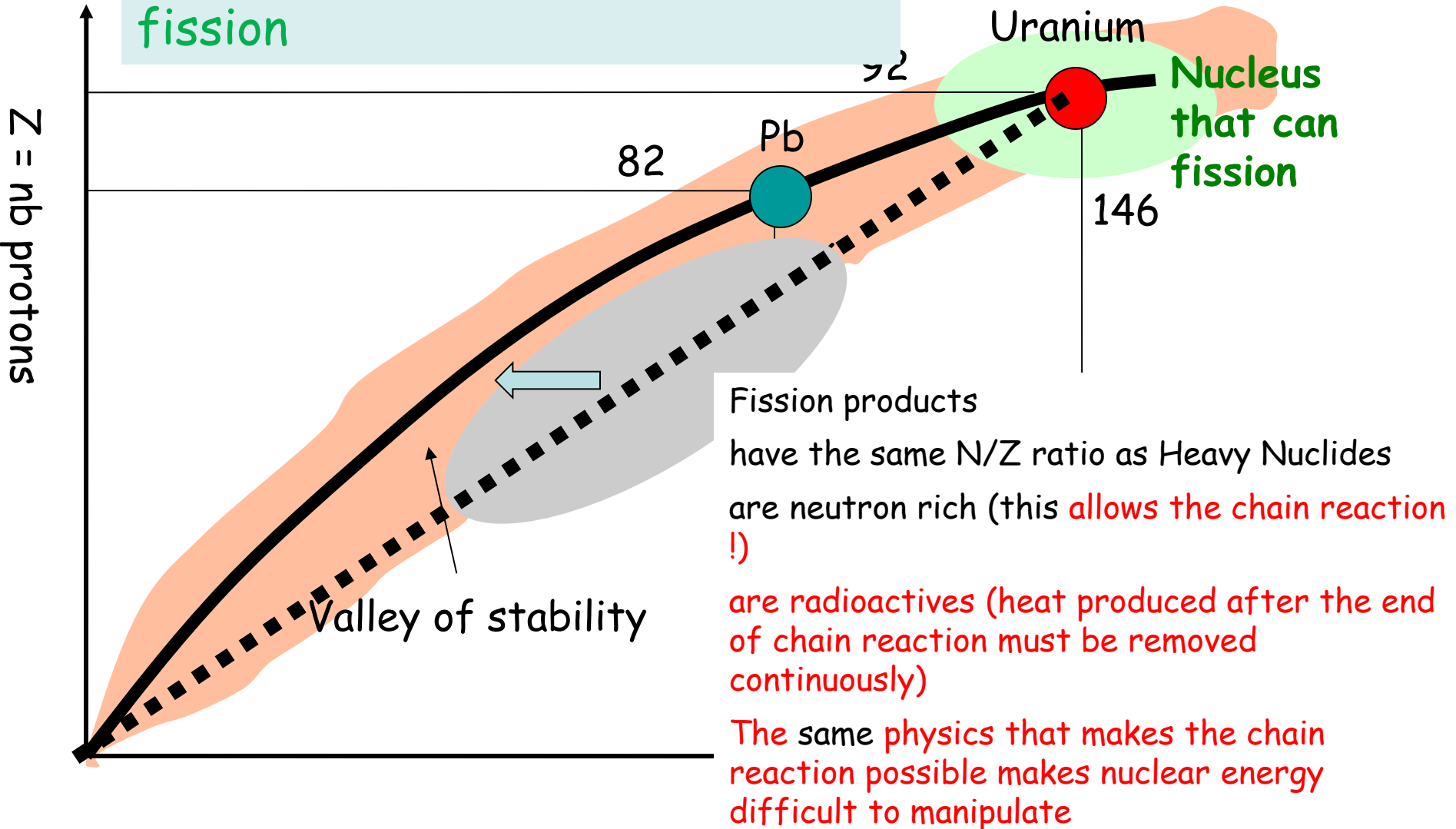
$$\rightarrow 32 \cdot 10^9 / 3.2 \cdot 10^{-11} = 10^{21} \text{ fissions} = \mathbf{0.4 \text{ gramme}}$$

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

Attention facteur 3 manquant pour l'énergie primaire

Can the chain reaction produce energy without radioactivity ?

Mass number is conserved in fission



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 circuit, reactor building)

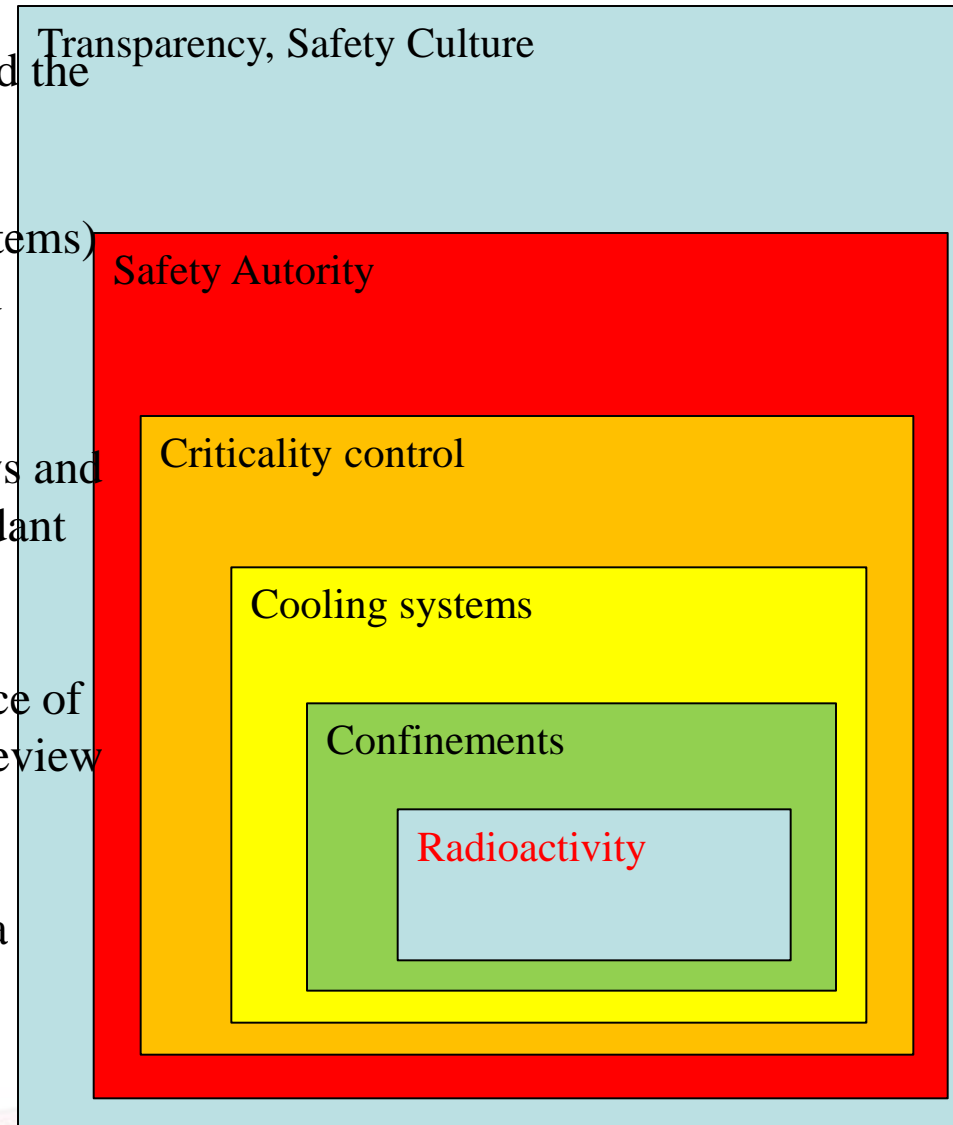
extract decay heat at all time (with different systems)

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**, independant from the industry interests if possible

You can improve the safety and social acceptance of nuclear energy by authorising local citizens to review the safety reviews : transparence.

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



La radioactivité, c'est dangereux

Effets directs « déterministes »

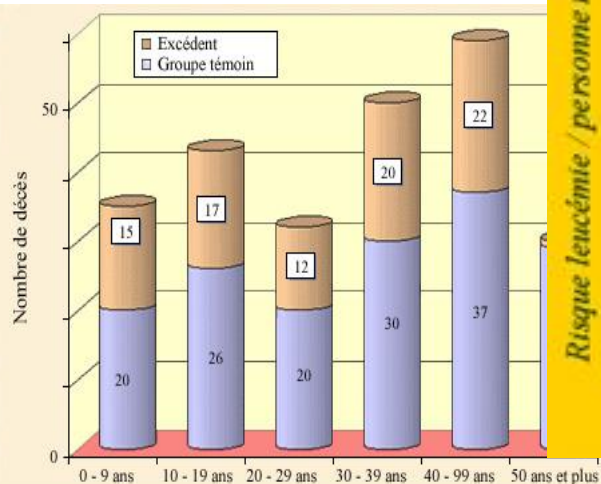
Nécrose, vomissement, ... mort

A très forte dose

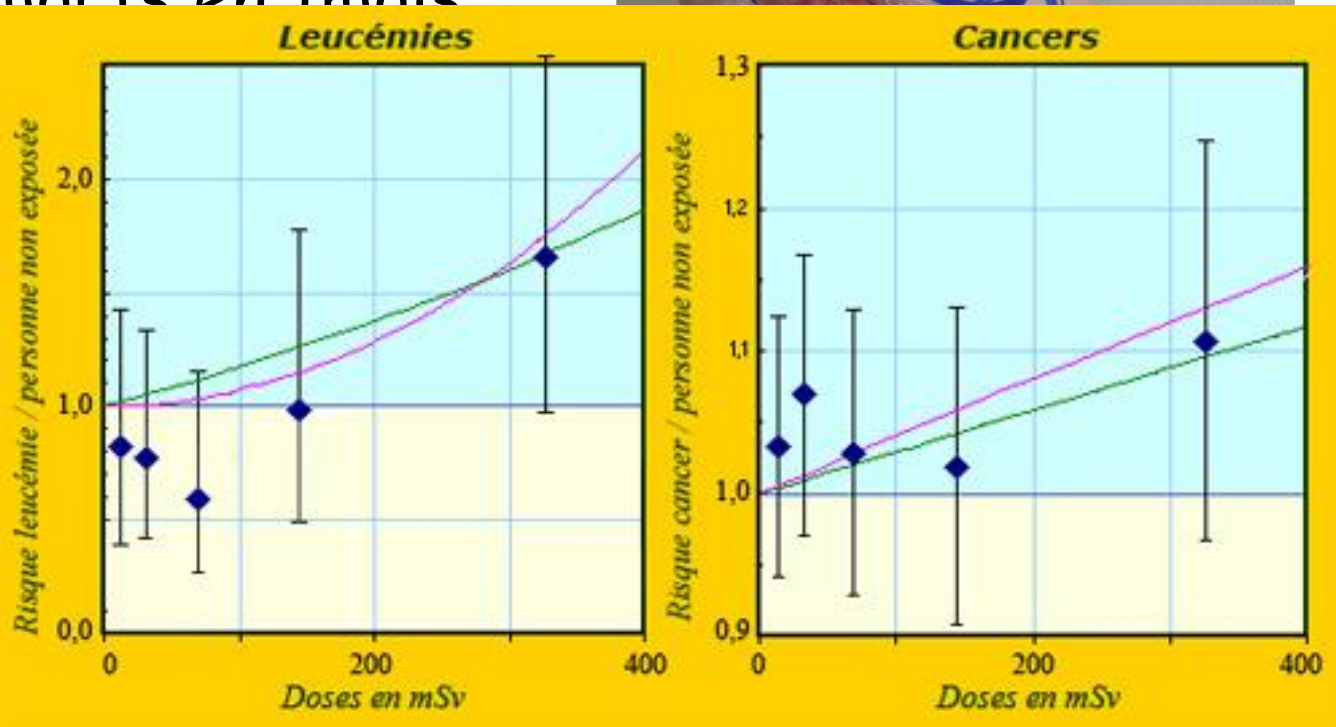
Tchernobyl >30 morts en 1 mois



Effets différés



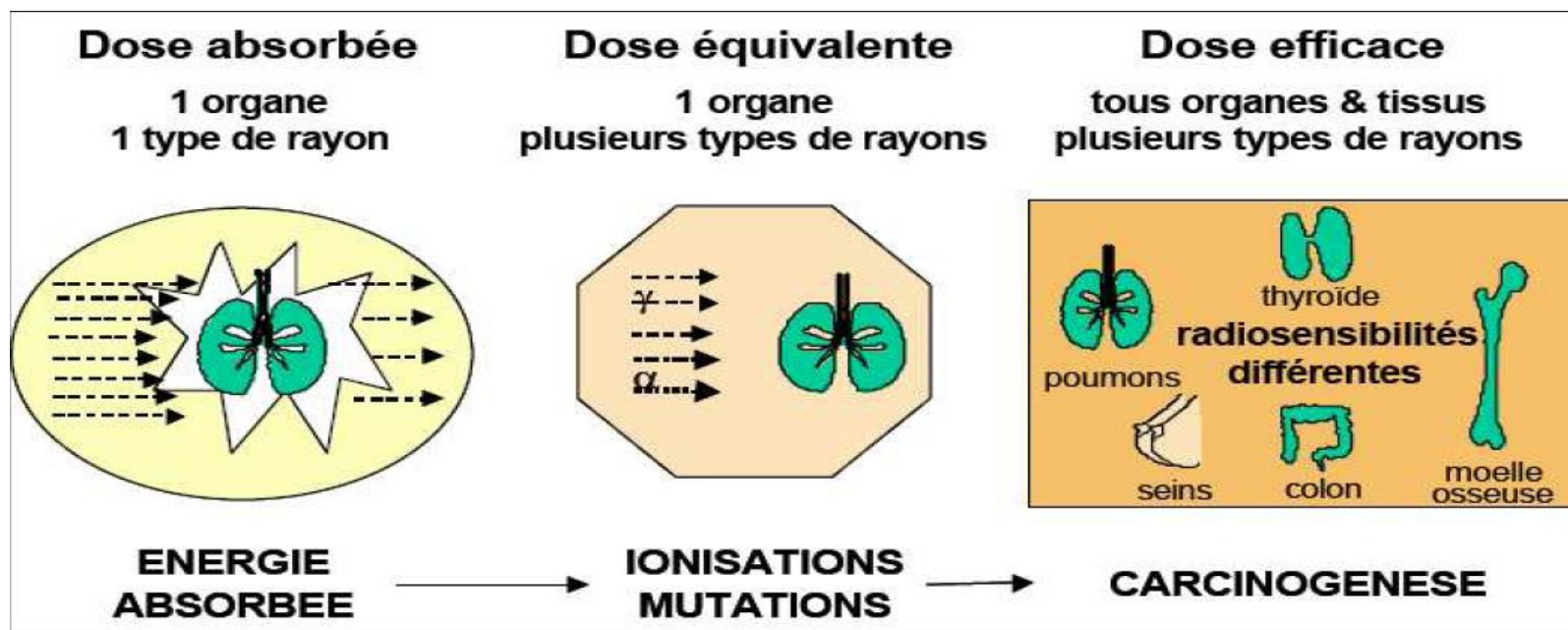
Leucémies



La radioactivité, on comprend rien

3 unités de mesures « principales »

- Le Becquerel (Bq) décroissances par seconde. Ex : je « fais » 7000Bq
- Le Gray (Gy) = énergie massique déposée . le 1Gy = 1J/kg. Dépend donc de l'énergie du rayonnement, et de sa pénétrabilité. Effets directs si irradiation >1Gy
- Le Sievert (Sv) = « dose » reçue. Mesure l'impact des rayonnement sur la biologie. Dépend du type de rayonnement (gamma<beta<alpha). Ex : dose moyenne annuelle naturelle en france = 2,4 mSv/an.



Impact Fukushima ?

100 000 déplacés

2000 travailleurs (100mSv)

Impact du déplacement mesurable : plusieurs personnes âgées décédées

Impact de la radioactivité probablement *non mesurables*

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

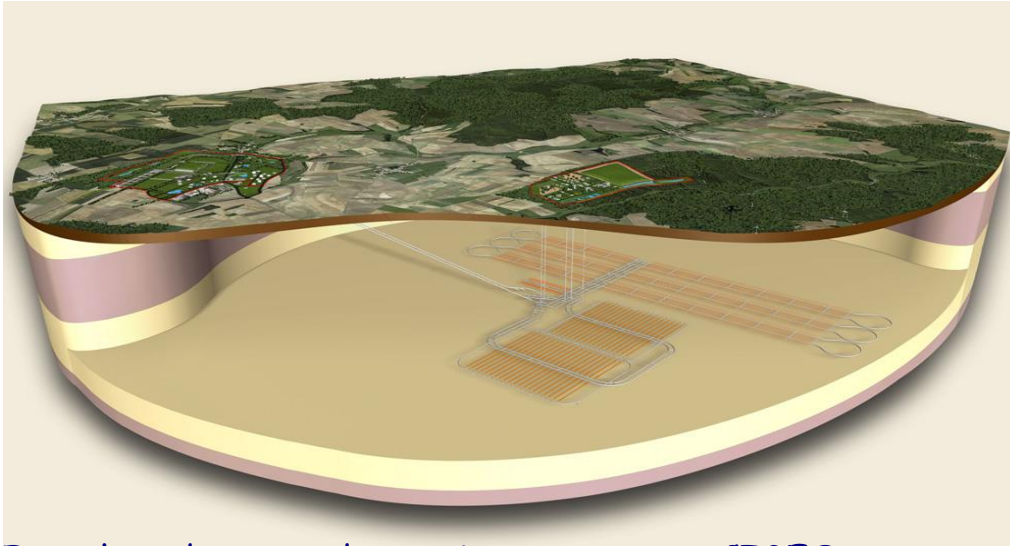
Non !! 17 % !!

Mais l'EPR c'est génération 3 !

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

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

Waste management



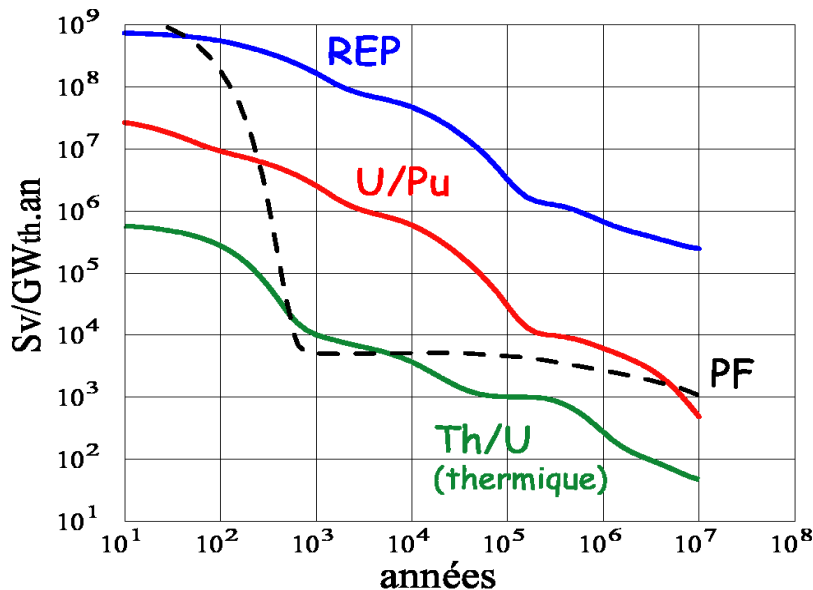
Underground final repositories will be dug in very stable geological grounds

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

French underground repository project : CIGEO

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



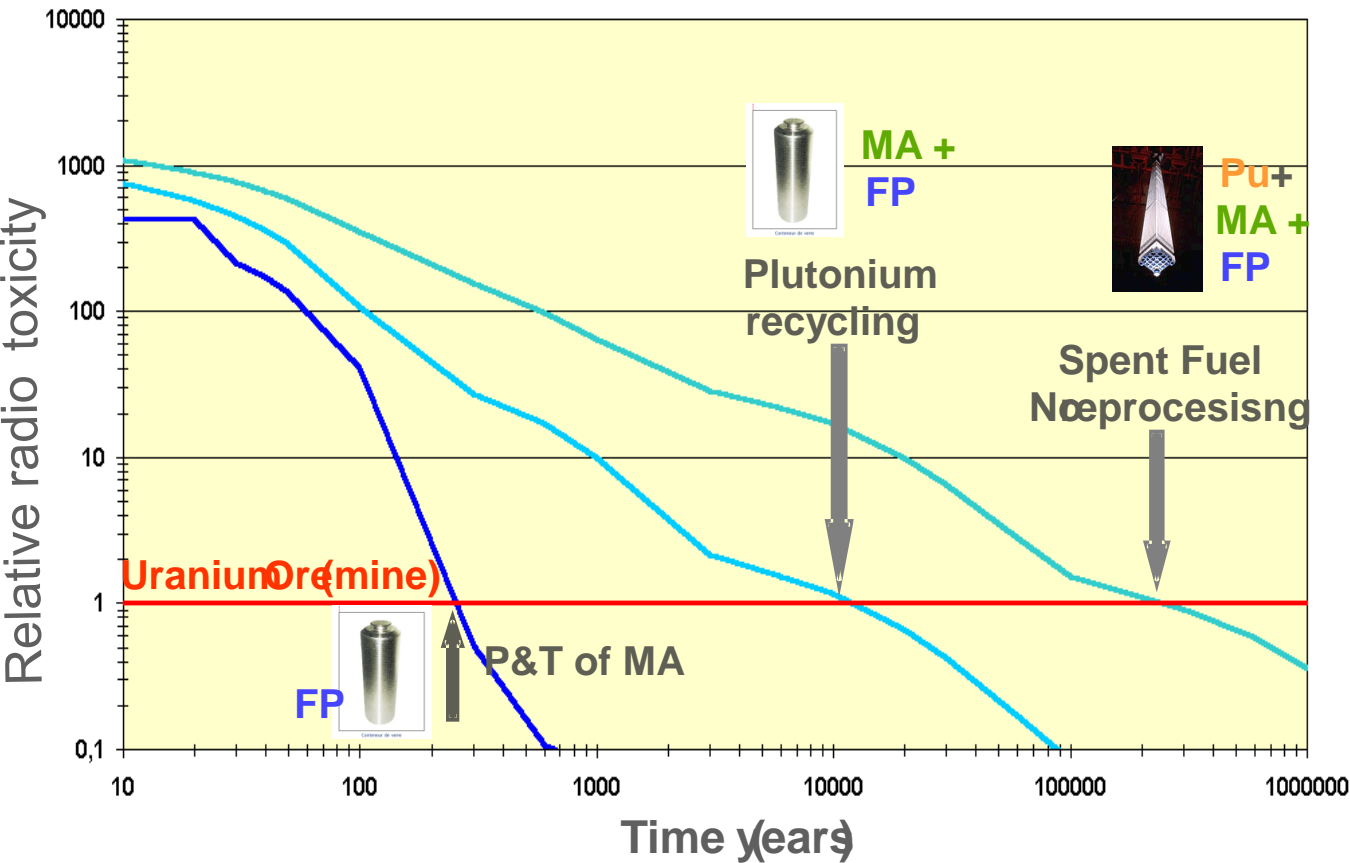
If Plutonium is used in reactors and recycled, the activity is decreased by more than a factor 10

If Thorium is used, another factor 10 could be achieved

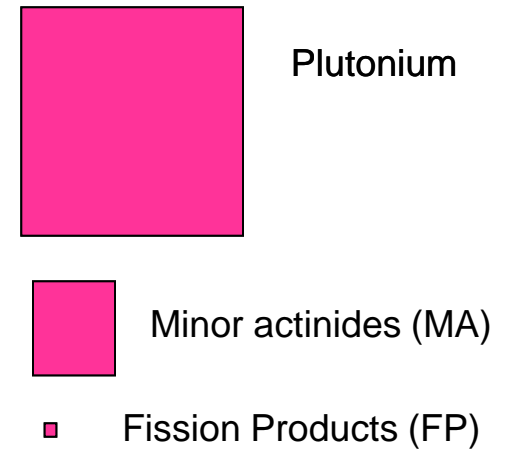
The solutions for waste management will be country specific and history specific

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



Radiotoxicity after 1000 years



Resources consumption

285 GWe (full power equiv.)

=====

60,000 t/year

Resources U (reserves+RAR+Inferred Resources)

12-25 millions of tons ??

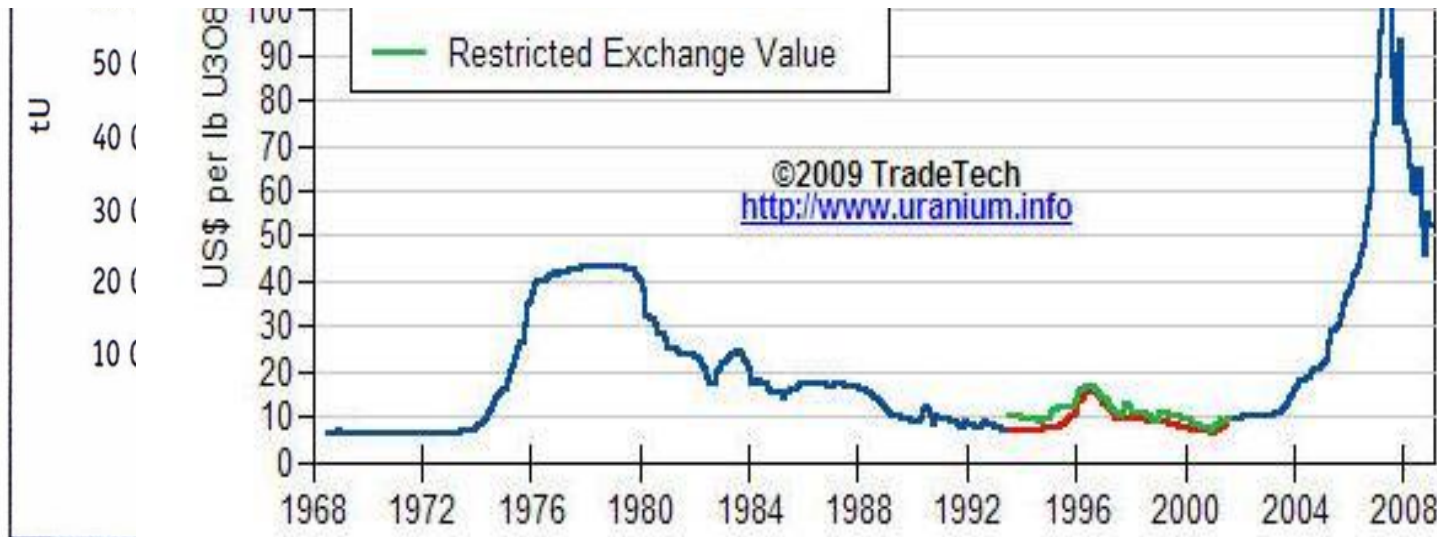
Production Potential

- at present rate (and use)

200 - 400 years

- scenario « nuclear x 8 »
& optimizations of U nat use in LWR

≈ 50 - 100 years



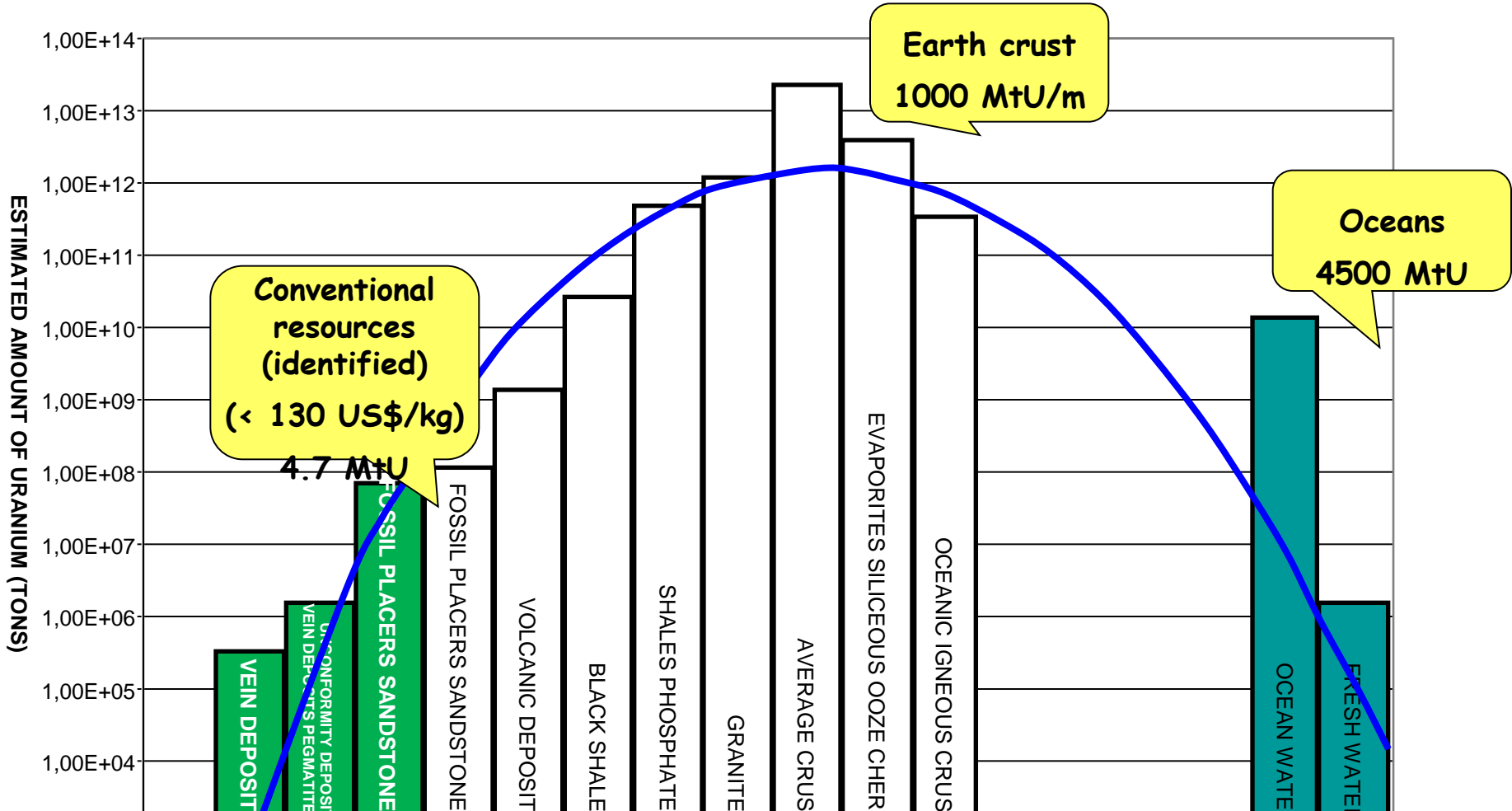
Imbalance between uranium consumption and extraction

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

What is the definition of the resources ?

16)

URANIUM RESOURCES



Conventional resources (identified) (< 130 US\$/kg)

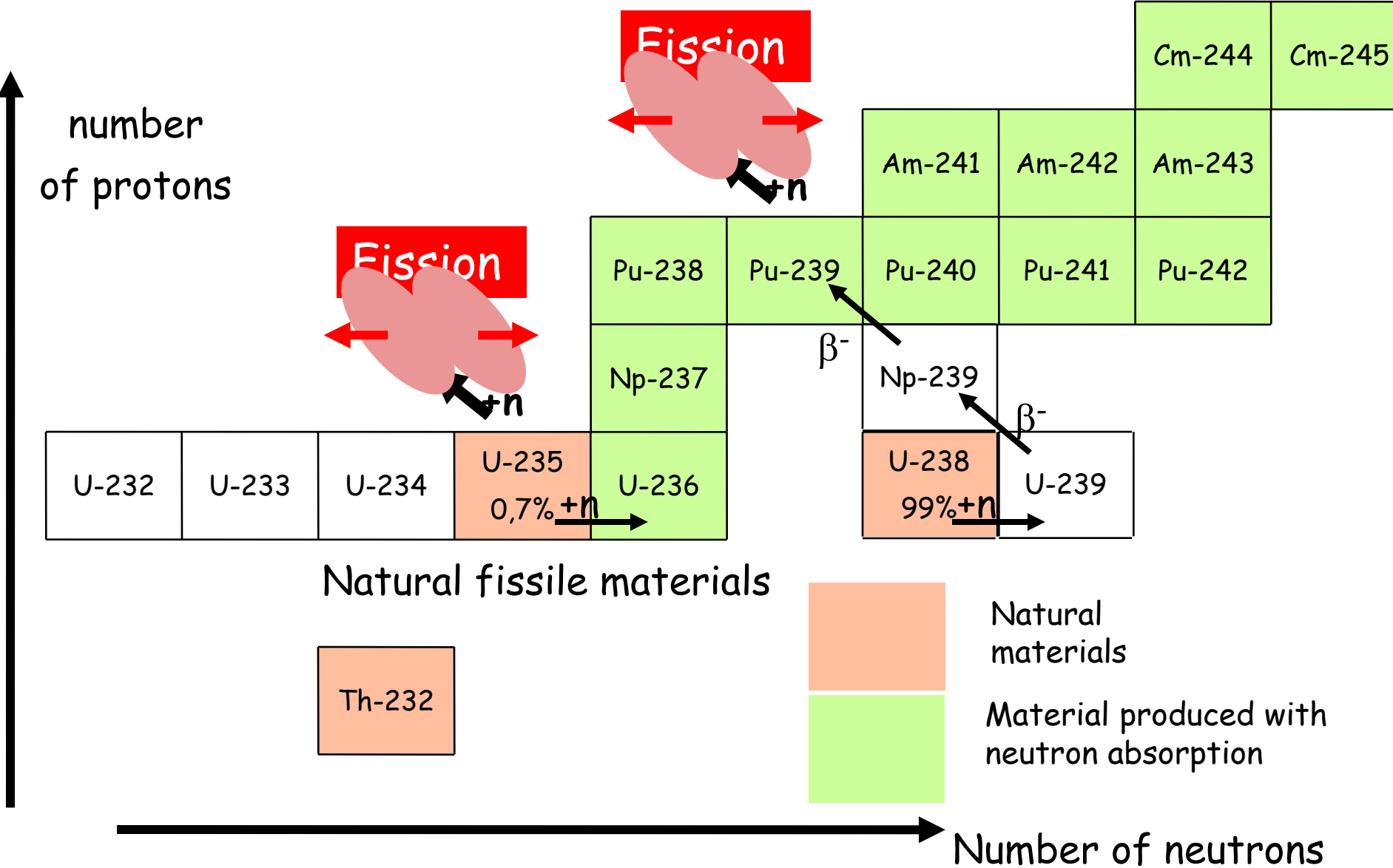
Earth crust 1000 MtU/m

Oceans 4500 MtU

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 ?



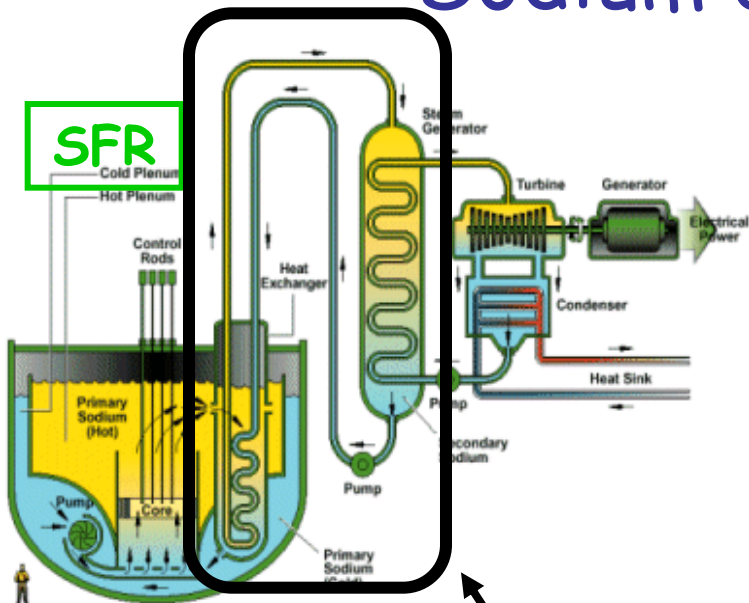
EBR I (1951-1964)
(Experimental
Breeder
Reactor) first
nuclear reactor
connected to the
grid!



SuperPhenix (1985-1997)
France has more
expericence with
dismantling a 1200MWe
Sodium breeder reactor
than D1/D3 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

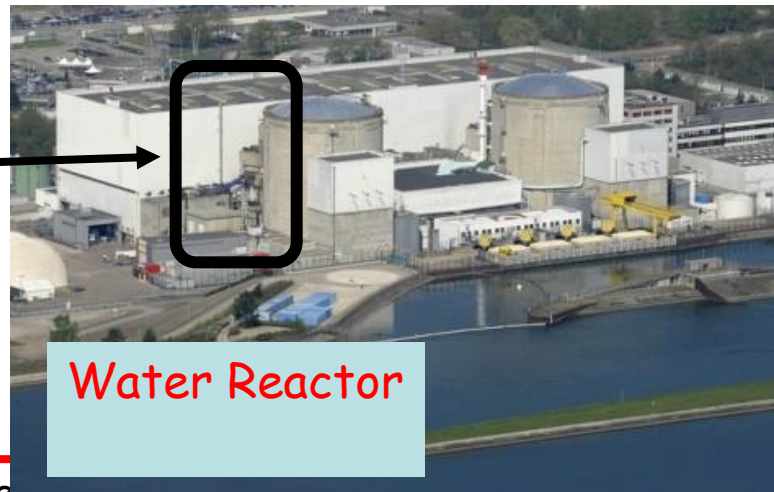
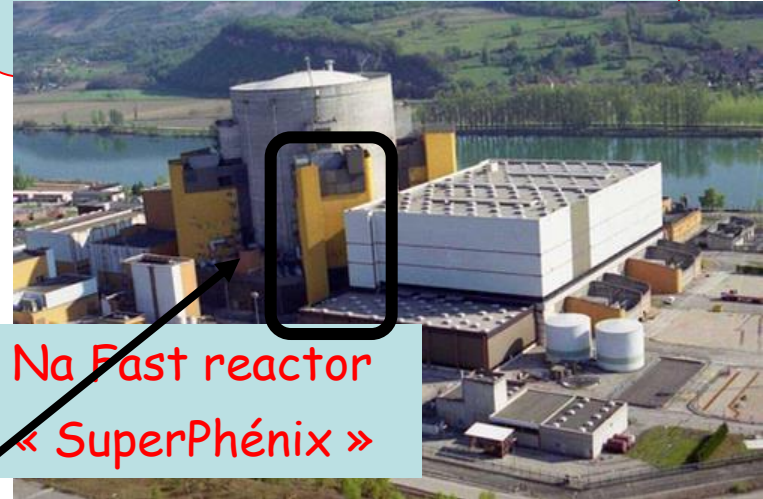
Temperature: 550°C

Closed fuel cycle

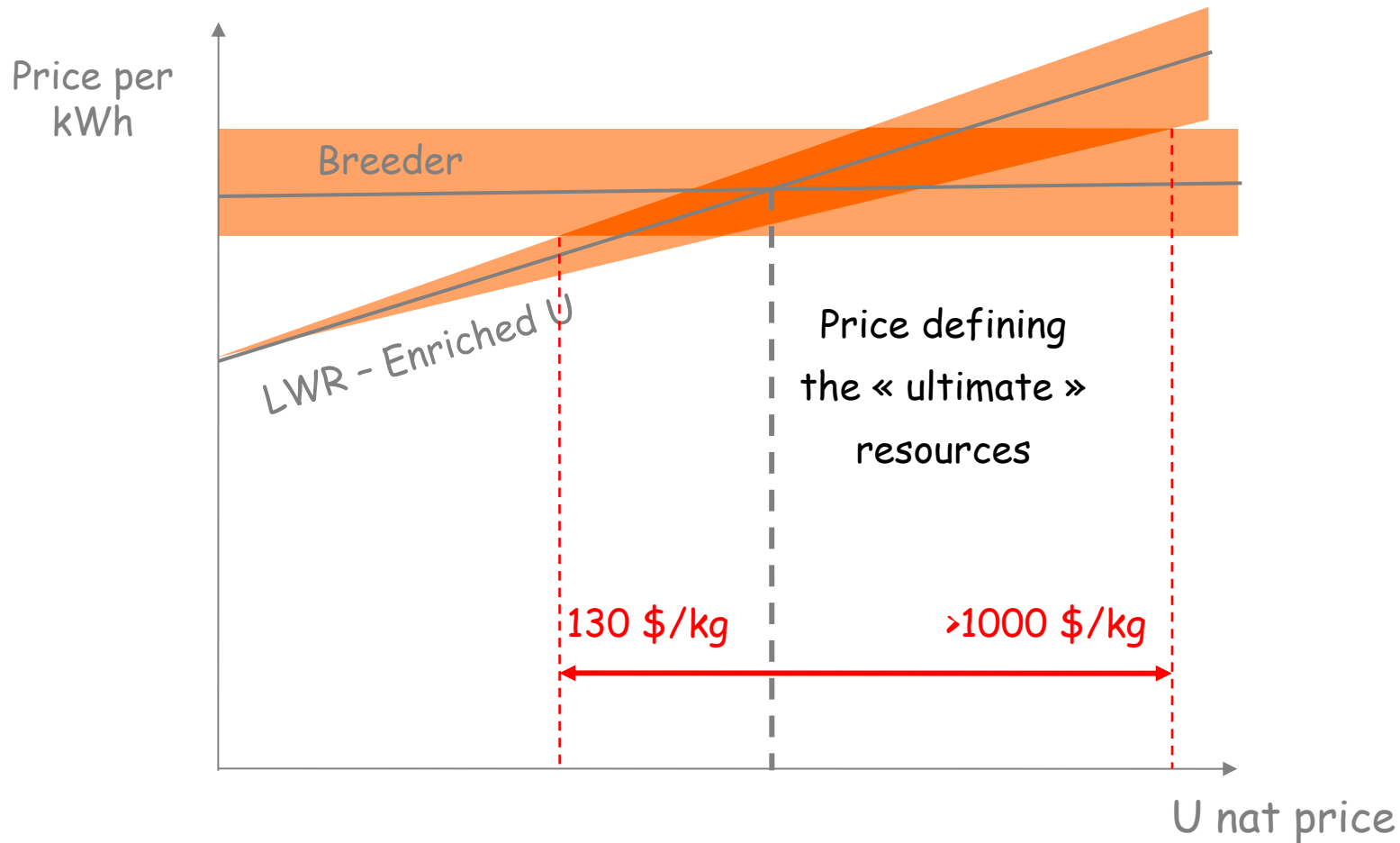
R&D

(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 against coal not to other nuclear reactors

The previous approach is too much 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 !

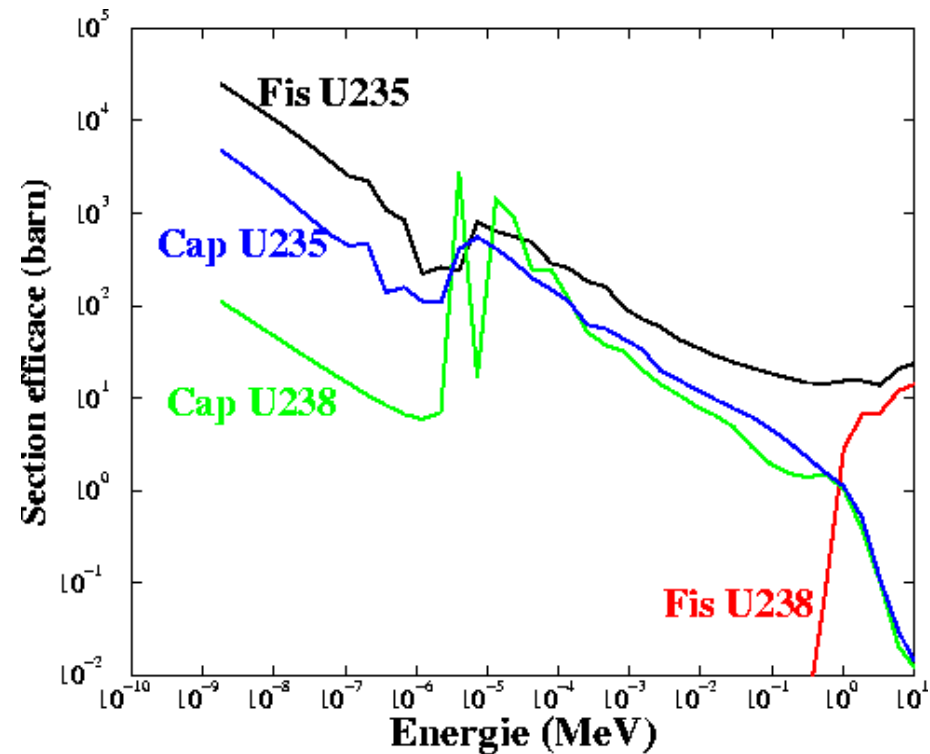
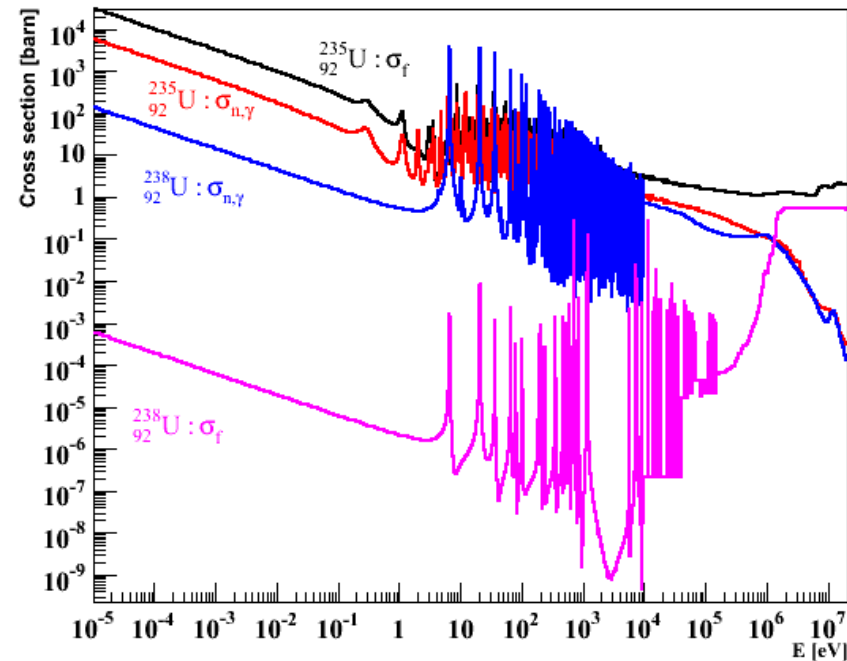
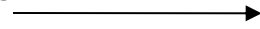


The possible development of breeders (if any) will be country specific...

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

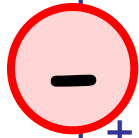
La régénération a besoin de neutrons

Pour une fission



neutrons sont produits

1 neutron induit la fission



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

$1 + \alpha$ neutrons capturés sur le fertile pour régénérer le fissile

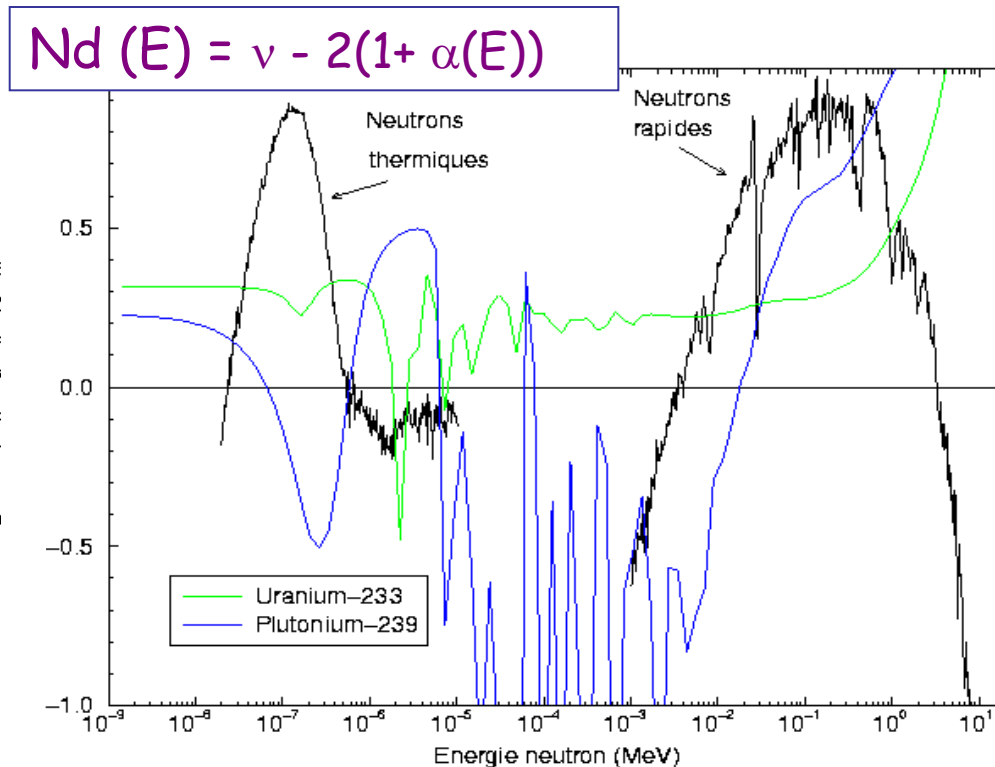
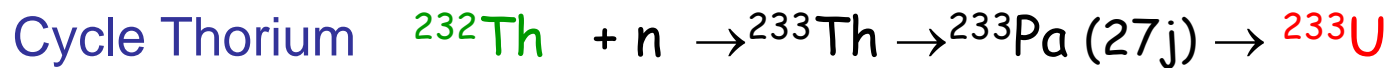
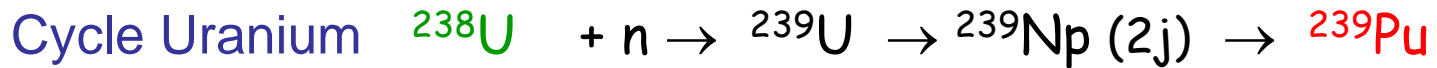
$\nu - 2 (1 + \alpha) > 0 \Rightarrow$ régénération possible

$< 0 \Rightarrow$ 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

Spectre rapide

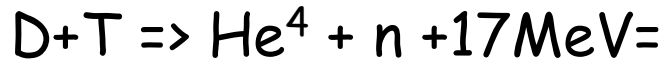
Th/U Nd > 0

Th/U Nd > 0

U/Pu Nd < 0

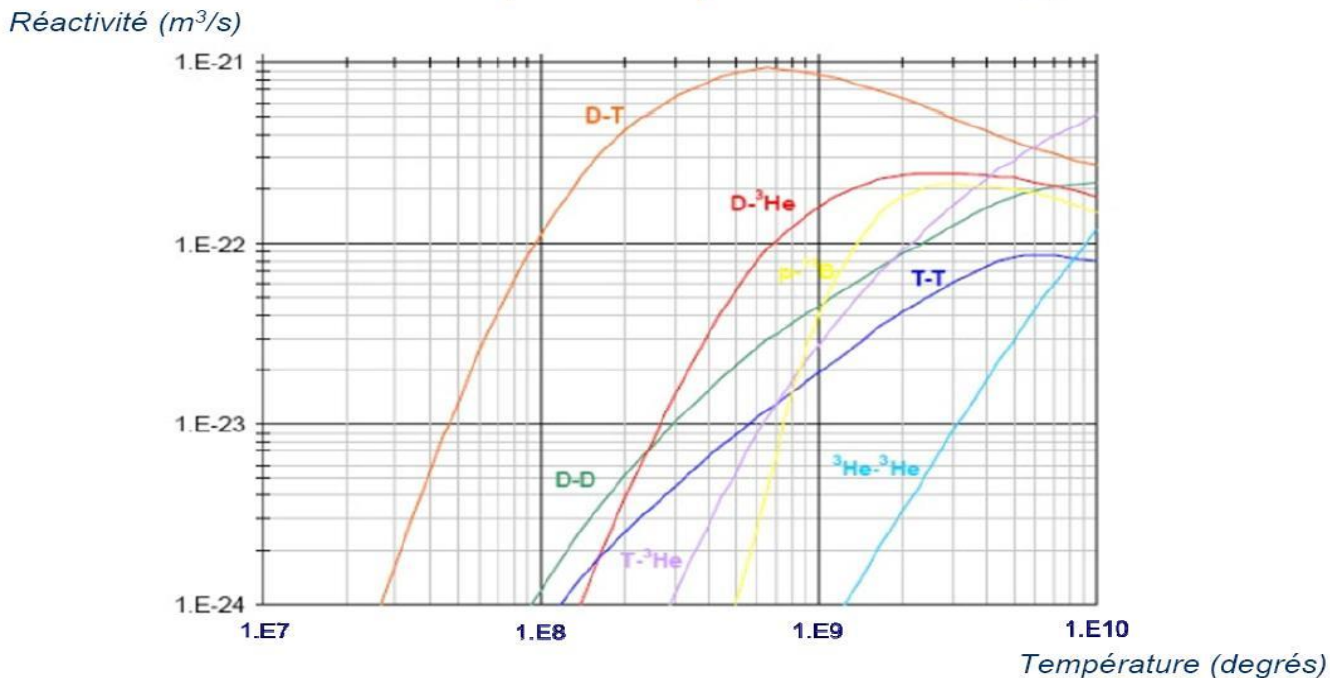
U/Pu Nd > 0

ITER : The Sun on Earth ?



D et T portent 1 charge électrique !

==> réaction à seuil !



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

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

In the sun : $4 H \rightarrow XX \rightarrow {}^4He$: WEAK interaction (1reaction / m³ / s)

ITER : The Sun on Earth ?

Contraintes :

Extraction de chaleur

(grande puissance,
Petite surface du tore)

Resistance aux neutrons

(porteurs de l'essentiel de l'énergie)

Bobines supra

(4K à <1m du plasma)

Regeneration du T...

(demi vie 13 ans, à régénérer sur du lithium)

La ressource rare est donc le Lithium

Schéma d'un réacteur de fusion D-T

