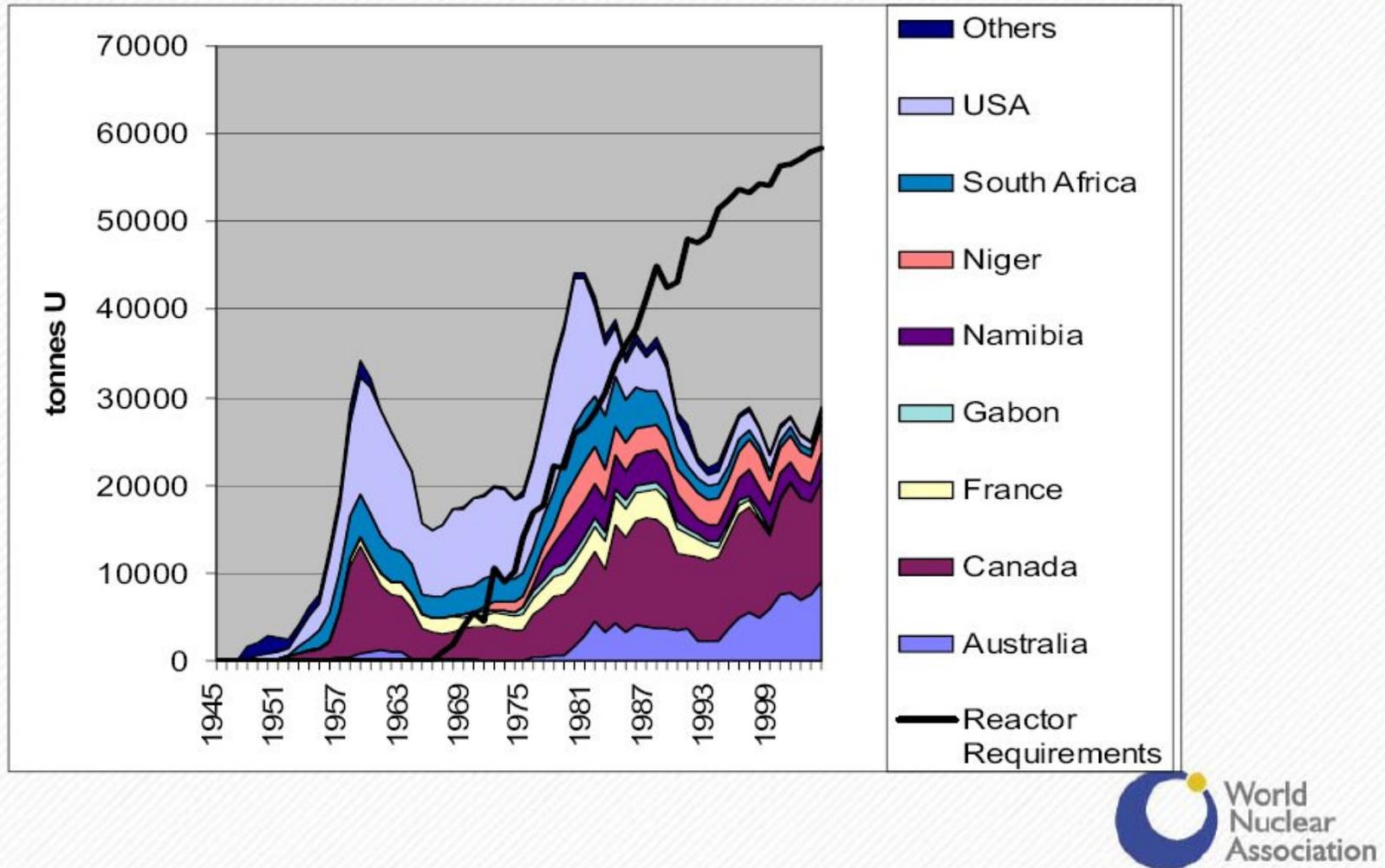


L'uranium dans le monde

Demande et production d'Uranium en Occident



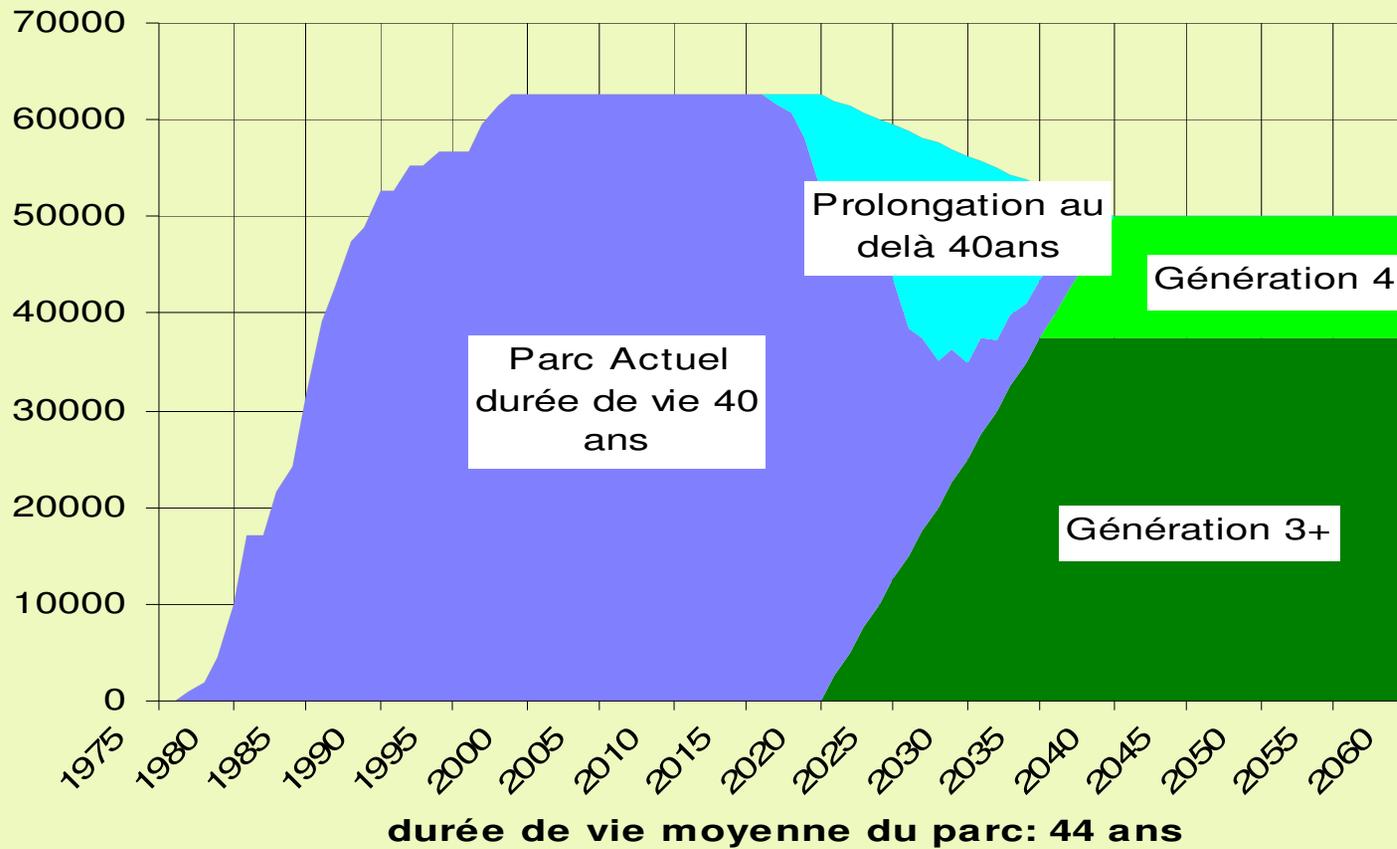
U naturel extrait / année 40.000 tonnes
Consommation mondiale : 65.000 tonnes

La différence est prise sur les stocks constitués dans les années 1960-80

Scénario de renouvellement

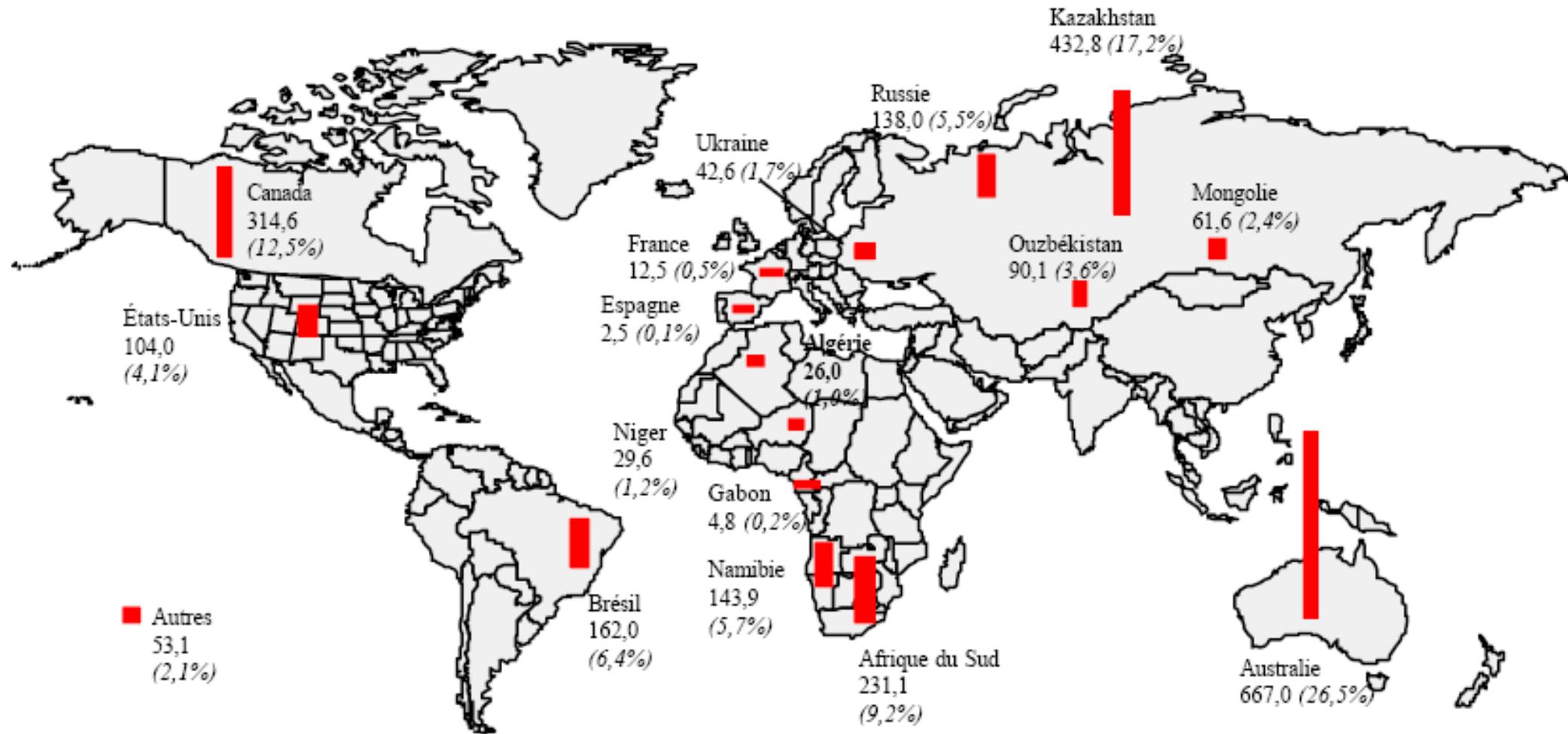
**Renouvellement à 50000MW étalé sur 20 ans
(2020-2040)**

rythme de construction nucléaire: 2500MW/an



Réserves mondiales d'uranium* au 1 janvier 2001

Unité : Millier de tonnes



Total monde : 2 516,1 milliers de tonnes (hors Chili et Chine)

(*) ressources raisonnablement assurées récupérables à moins de 80\$/kg U

Source : Observatoire de l'énergie d'après AIEA/OCDE 2001

En années : 35 ans !

Surgénérateurs - la IVe génération

Le futur nucléaire

Pour éviter l'utilisation massive du charbon et l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère, il faudrait augmenter de 5 ou 10 fois le nombre actuel de centrales nucléaires.

Ceci est impensable, a cause de :

- la rareté de l'**U-235** (0.71 % de l'uranium naturel),
- la quantité de **déchets** nucléaires à stocker,
- le danger de **prolifération** lié aux réacteurs.

Les solutions existent, mais demandent à être développées :

- La **surgénération**, avec l'**U-238** (IVe génération)
- La **surgénération** avec le **Th-232** (IVe génération)
- La **fusion** nucléaire (Ve génération)

Une nouvelle génération : comment?

Deux voies principales:

- Uranium 238 : réacteurs à neutrons rapides
- Thorium 232 : réacteurs à neutrons rapides

Dans tous les cas, on « produit » autant d'atomes fissiles qu'on en consomme, et on les récupère dans une opération de retraitement: on fonctionne en cycle fermé.

En France, Phénix et Superphénix ont été des réacteurs de « Quatrième génération » avant la lettre.

L'usine de retraitement de La Hague ouvre également la voie.

Les surgénérateurs

Dans un surgénérateur (an anglais breeder) un élément naturel

U-238 ou Th-232, dits "fertiles"

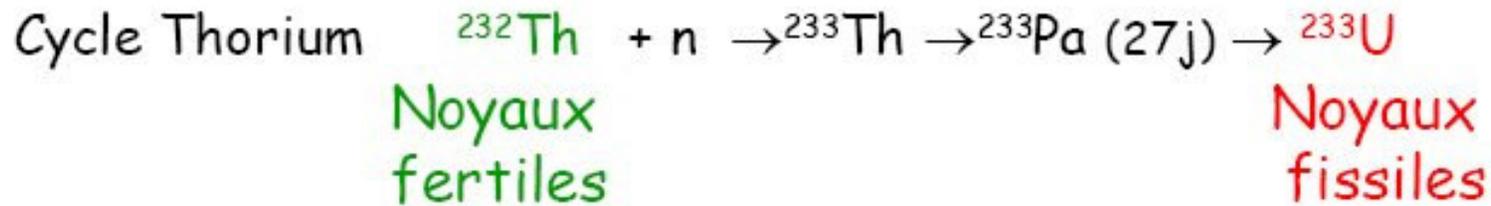
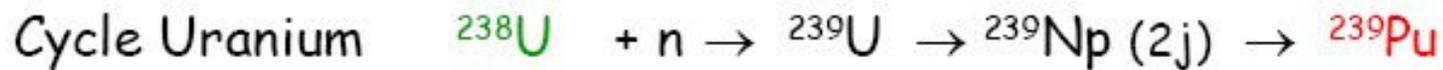
est progressivement transformé dans un dérivé "fissile"

Pu-239, respectiv. U-233

qui assure la réaction nucléaire, le tout dans le même réacteur.

L'énergie nucléaire : la surgénération

Recours à la surgénération (potentiel du minerai x200)



- Si on a recours à la surgénération, TOUT le minerai d'uranium est utilisé
- Le potentiel énergétique est multiplié par 200
- Les réserves estimées correspondent à plusieurs milliers d'années de production
- On peut aussi utiliser le thorium

La surgénération et la fusion en bref

Cycle du Thorium :



Cycle de l'Uranium 238 :



Deux neutrons 'rapides', un pour la fission et un pour le 'breeding' sont nécessaires, au lieu d'un seul avec l'U(235).

Fusion Lithium-Tritium-Deutérium :



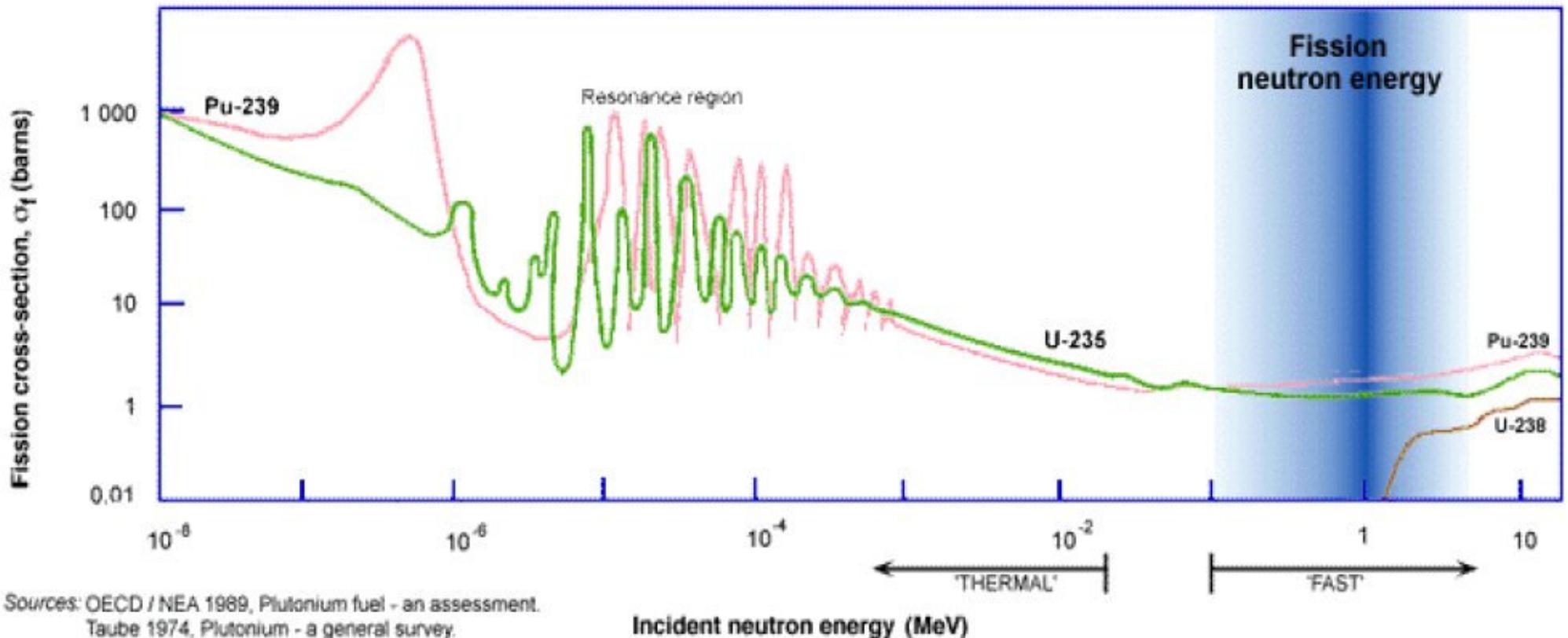
Probabilité de capture d'un neutron par les noyaux lourds

La fission de U-235 et Pu-239 procède mieux avec des neutrons lents (thermiques)



La fertilisation de U-238 et Th-232 requière des neutrons 'rapides' (énergétiques)

NEUTRON CROSS-SECTIONS FOR FISSION OF URANIUM AND PLUTONIUM



Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.
Taube 1974, Plutonium - a general survey.
1 barn = 10^{-28} m², 1 MeV = 1.6×10^{-13} J

Promesses

- La totalité de l'élément 'fertile' est utilisé (soit 100x plus d'énergie par rapport à un réacteur conventionnel).
- La plupart de déchets sont aussi 'incinérés' dans le réacteur.
- Les déchets accumulés dans les derniers 50 ans deviennent du 'combustible' !
- Le Th-232, 4 fois plus abondant que l'uranium, ne génère à aucun moment de sous-produits utilisables comme armes atomiques (→ pays en développement).

Utiliser des neutrons rapides ?

Des neutrons rapides ne peuvent pas être arrêtés par une cuve remplie d'eau, même sous pression.

Comme liquide plus dense, on utilise un métal en fusion (le sodium dans Superphénix, le lithium dans ITER, le plomb dans le Rubbiatron).

Les métaux légers en fusion sont très corrosifs, inflammables au contact de l'air, etc. L'utilisation de pompes, conduits, cellules de filtrage etc. sont synonyme de problèmes (voir Superphénix).

ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor

Vitesse de réaction et de régulation

Pour qu'une réaction nucléaire se maintienne, mais reste contrôlable, un réacteur doit être maintenu à l'état "critique", avec un coefficient de réaction $k = 1$.

La fission de l'U-235 peut être contrôlée aisément en 'capturant' une partie des neutrons 'lents' (7 ‰) qui participent à la réaction : temps de régulation : secondes à minutes.

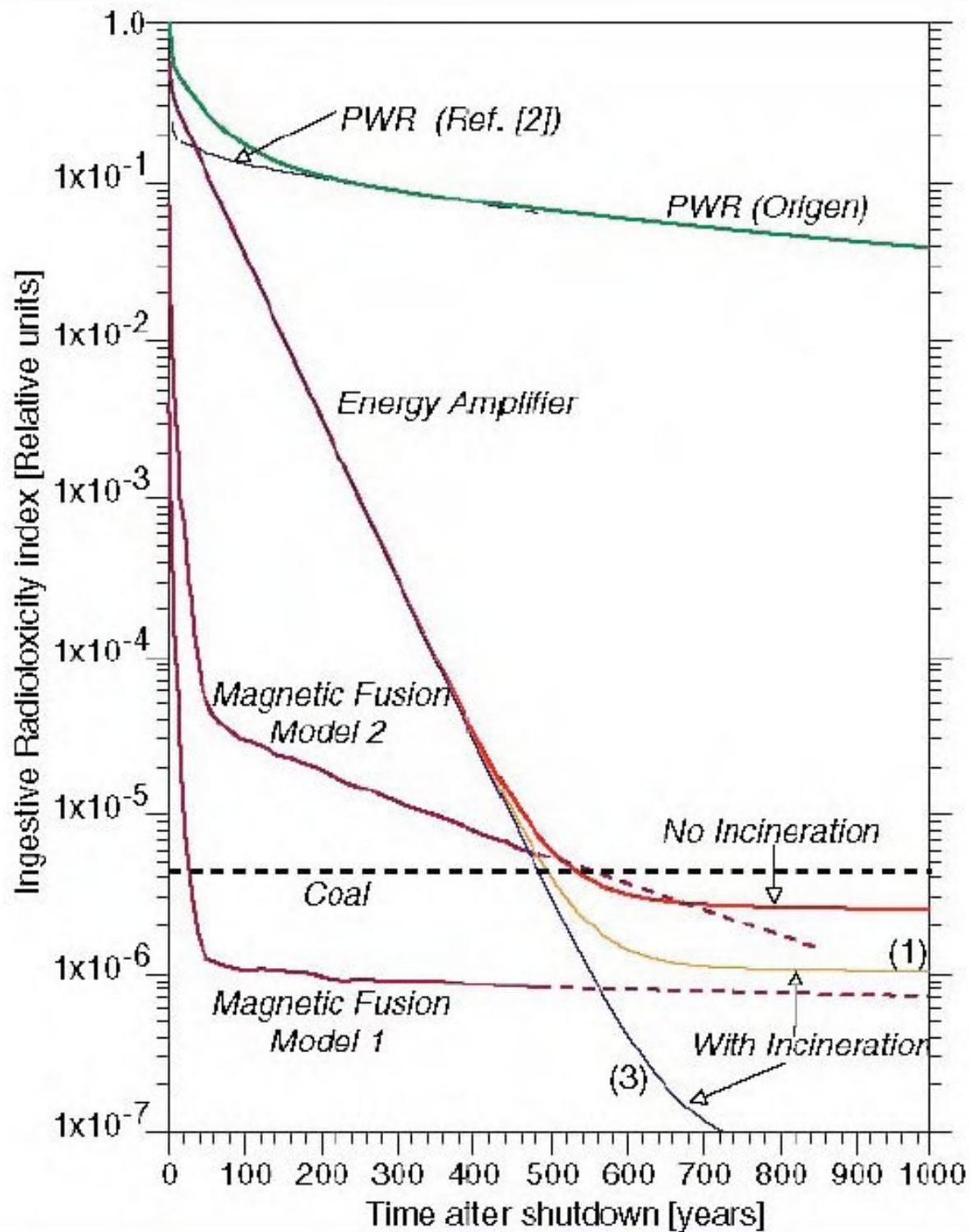
Un surgénérateur fonctionnant avec des neutrons 'rapides', les temps de régulation sont de l'ordre des microsecondes. Le réglage est critique (au sens littéral, cette fois).

Les déchets d'un surgénérateur

Après 5-10 ans d'exercice, 10-15% de la masse métallique naturelle (Th-232 ou U-238) a brûlé, en produisant 100-150 GWjour/tonne); le combustible doit être régénéré (dégradation + dommages par radiation).

Les résidus sont très radioactifs, mais seulement pendant 300 ans. Les Actinides ($Z \geq 90$) à longue demi-vie peuvent être remis dans le cycle.

Ceux qui échappent au recyclage sont un très faible pourcentage par rapport aux réacteurs actuels.



C. Rubbia - prix Nobel en 1983, ex-directeur du CERN

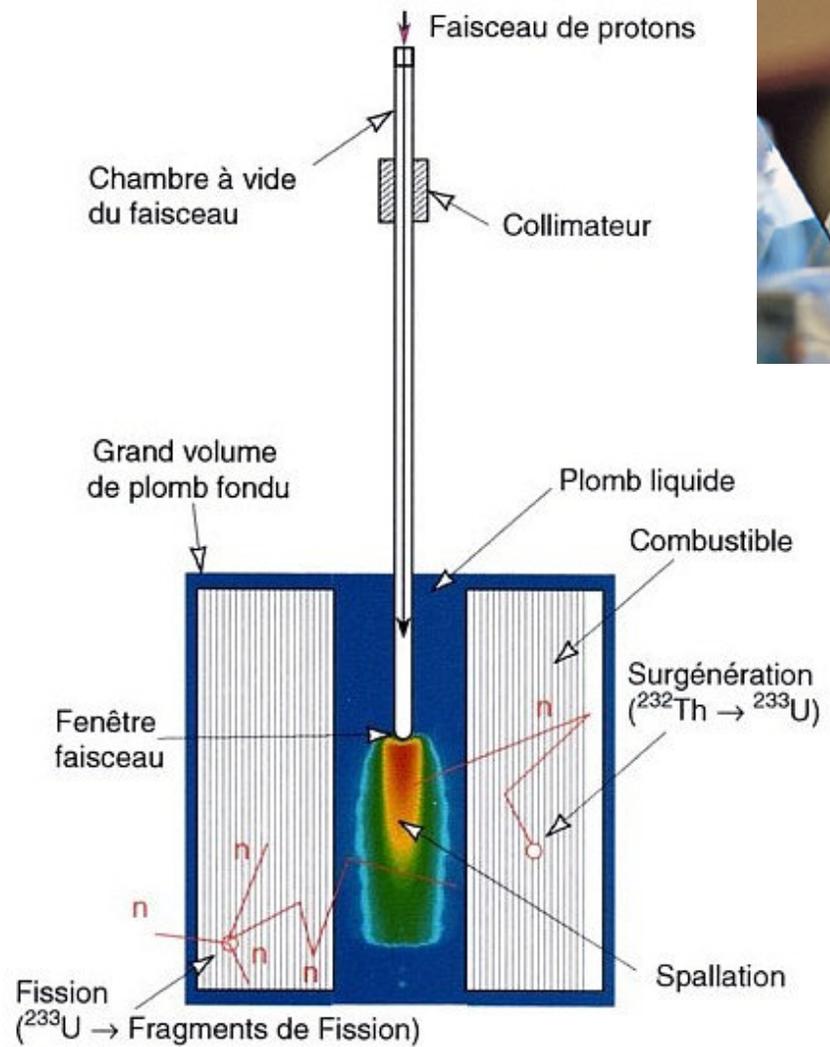
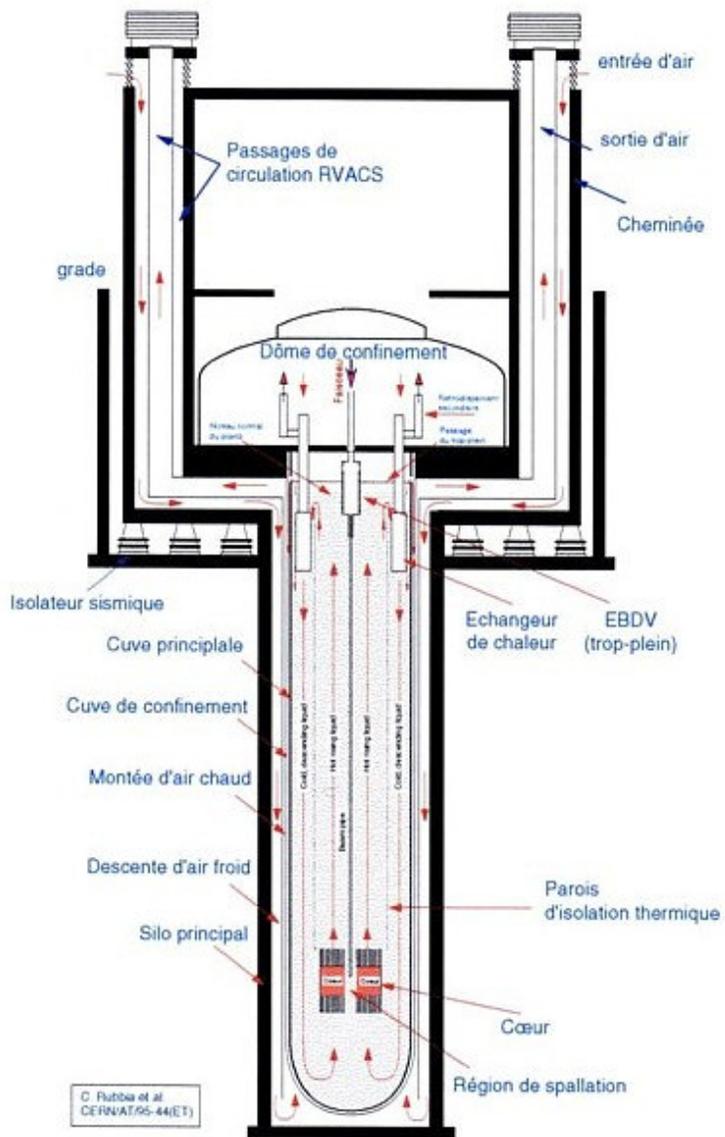
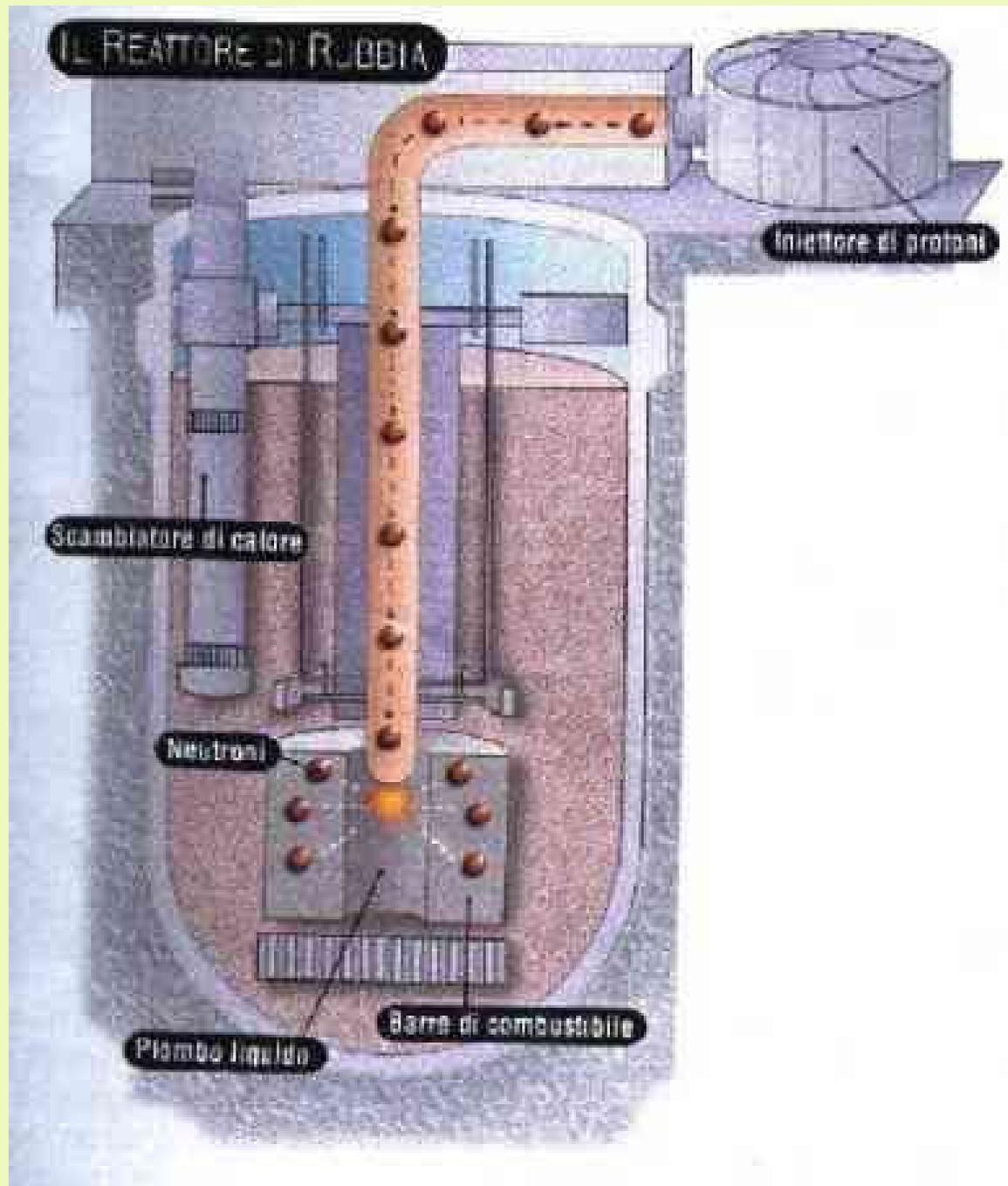
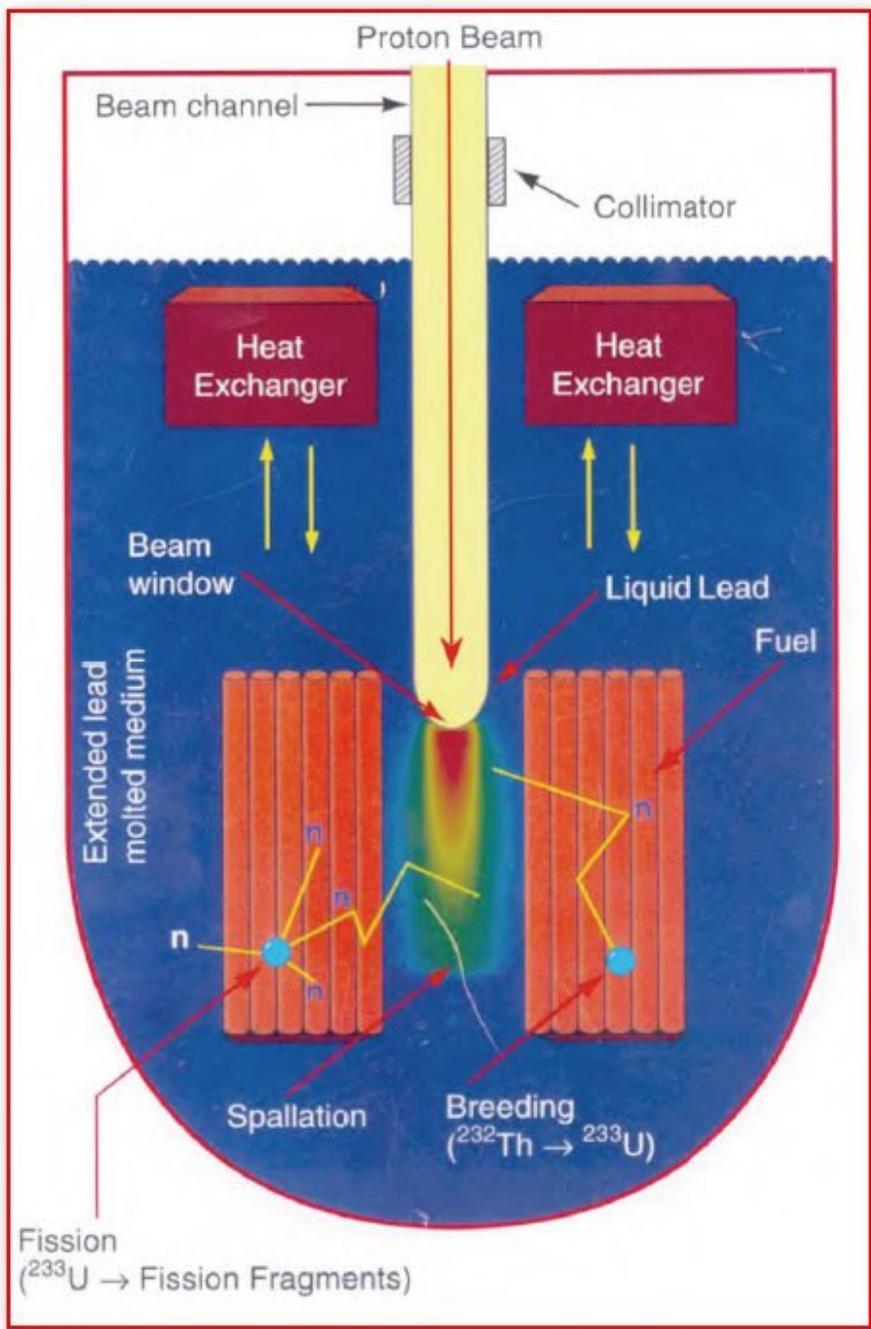
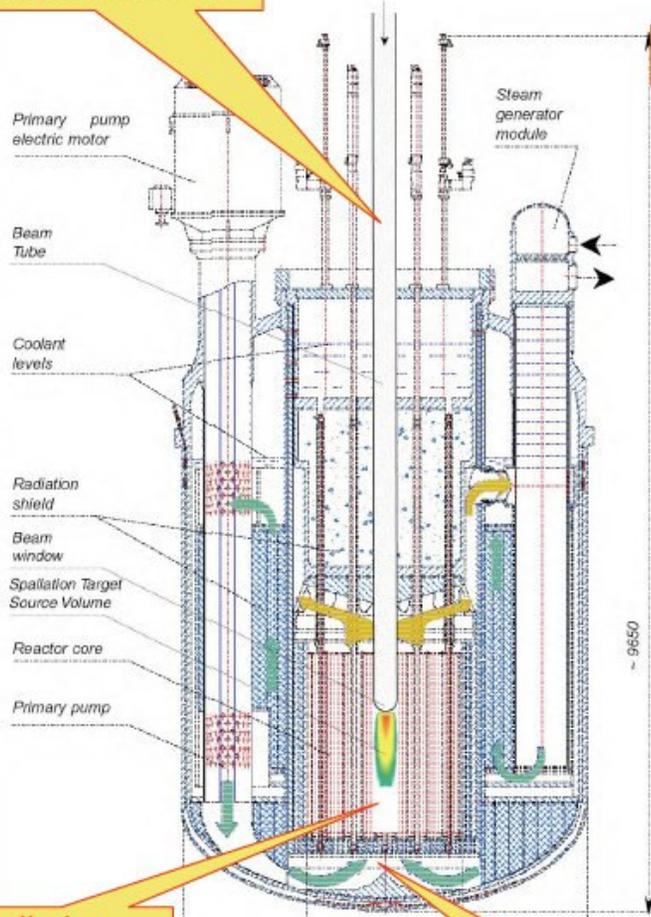


Figure 30 : Schéma de l'Amplificateur d'Énergie (adapté de la Ref. 1), et schéma de principe montrant la « flamme » de neutrons produits par le faisceau de protons se propageant jusqu'au cœur du système où elle permet de détruire les TRU par fission.



Typical Pb-Bi fast sub-critical unit (Russian design)

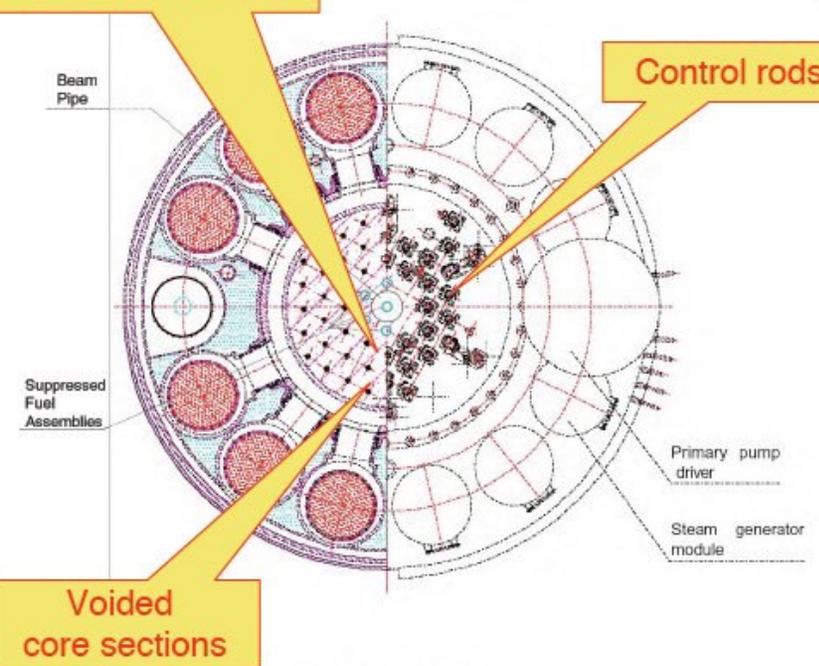
Beam and insertion tube



Spallation n-source

Voided core sections

Beam and insertion tube



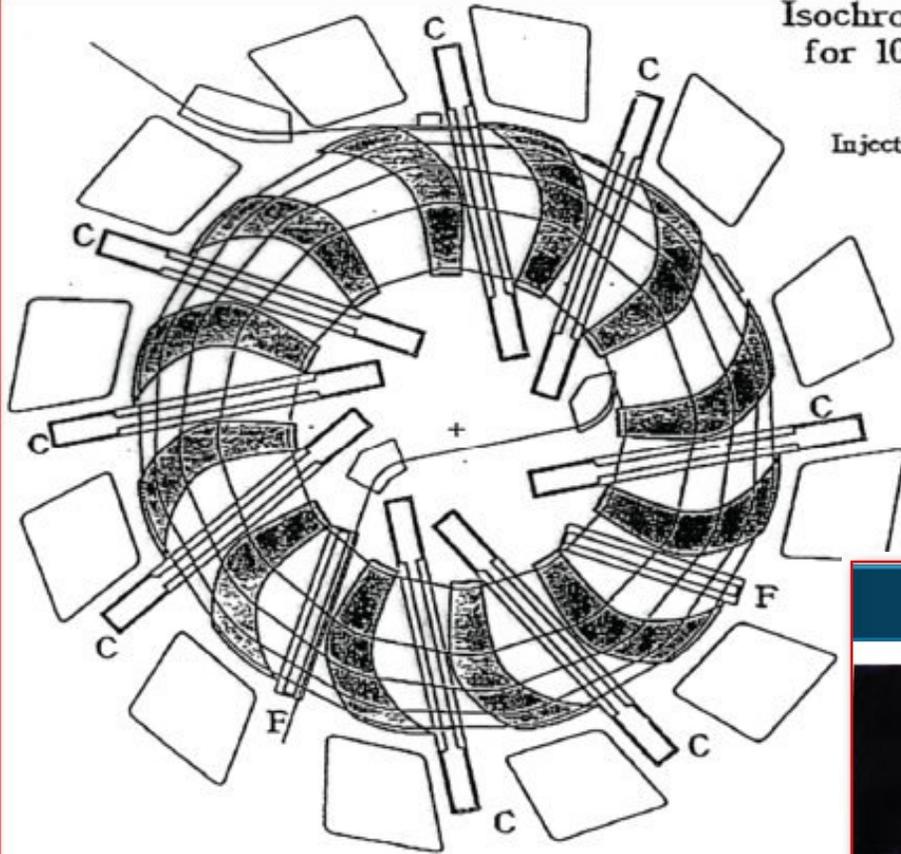
Voided core sections

Fig. 2. Reactor Top View

$T_p = 600 \text{ MeV}$
 $I_p = 3.5 \text{ mA/GWth for } k = 0.995$
 $I_p = 7.0 \text{ mA/GWth for } k = 0.99$

Sweden, June 2005

Slide# : 21



Isochronous Cyclotron for 10 mA at 1 GeV

Main Characteristics:

Injection Energy 120 MeV

12 Sectormagnets

Max. Field 21 T

Extraction

Radius (av) 5.67 m

Cyclotron

Frequency 7.36 MHz

C: 8 Accelerating

Cavities 44.17 MHz

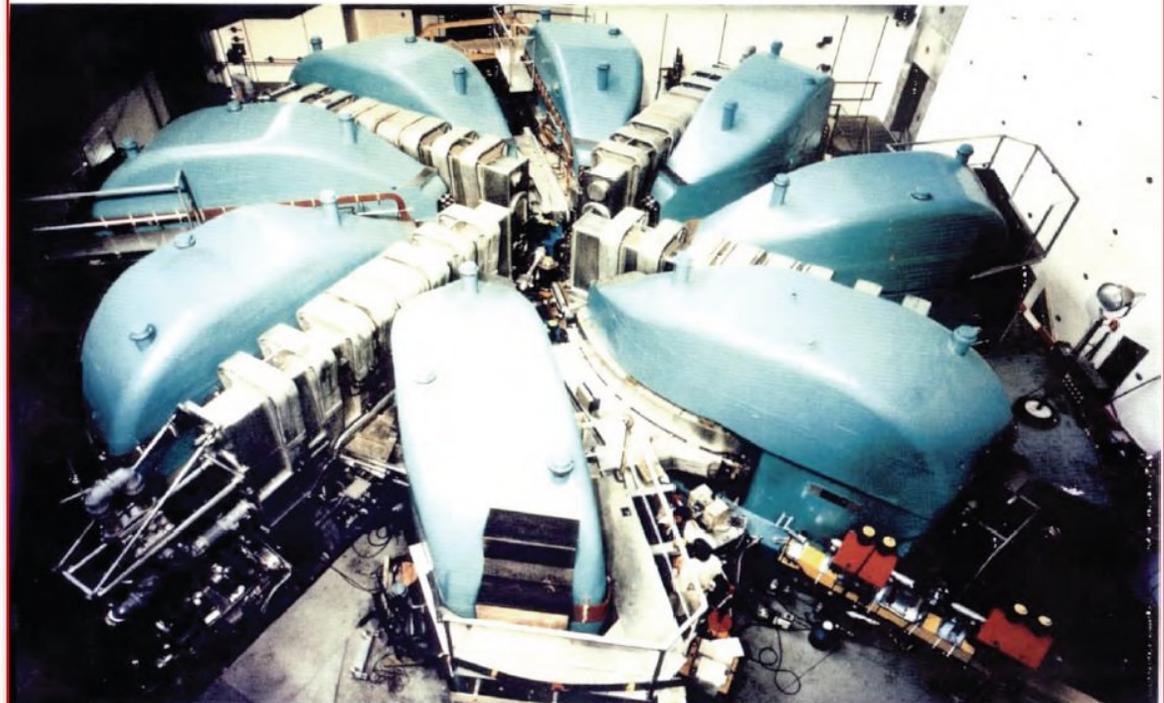
Peak Voltage 1 MV

Harmonic Num. 6

F: 2 Flat-Top

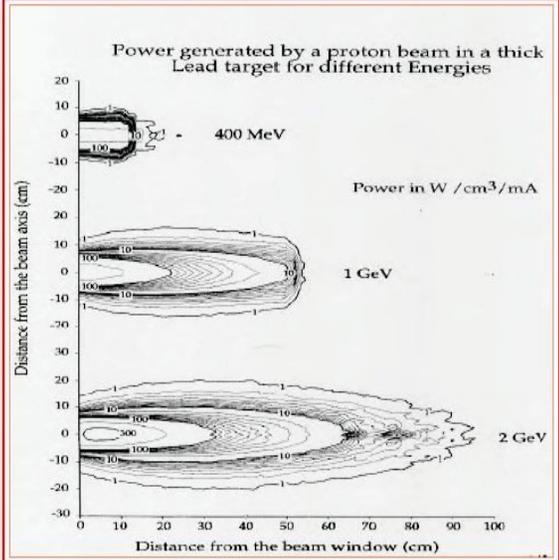
$10 \text{ mA at } 1 \text{ GeV} = 10 \text{ MWatt}$
 Efficiency of conversion from AC to beam $\approx 50 \%$
 Injection energy 120 MeV

The 600 MeV cyclotron: PSI as a model

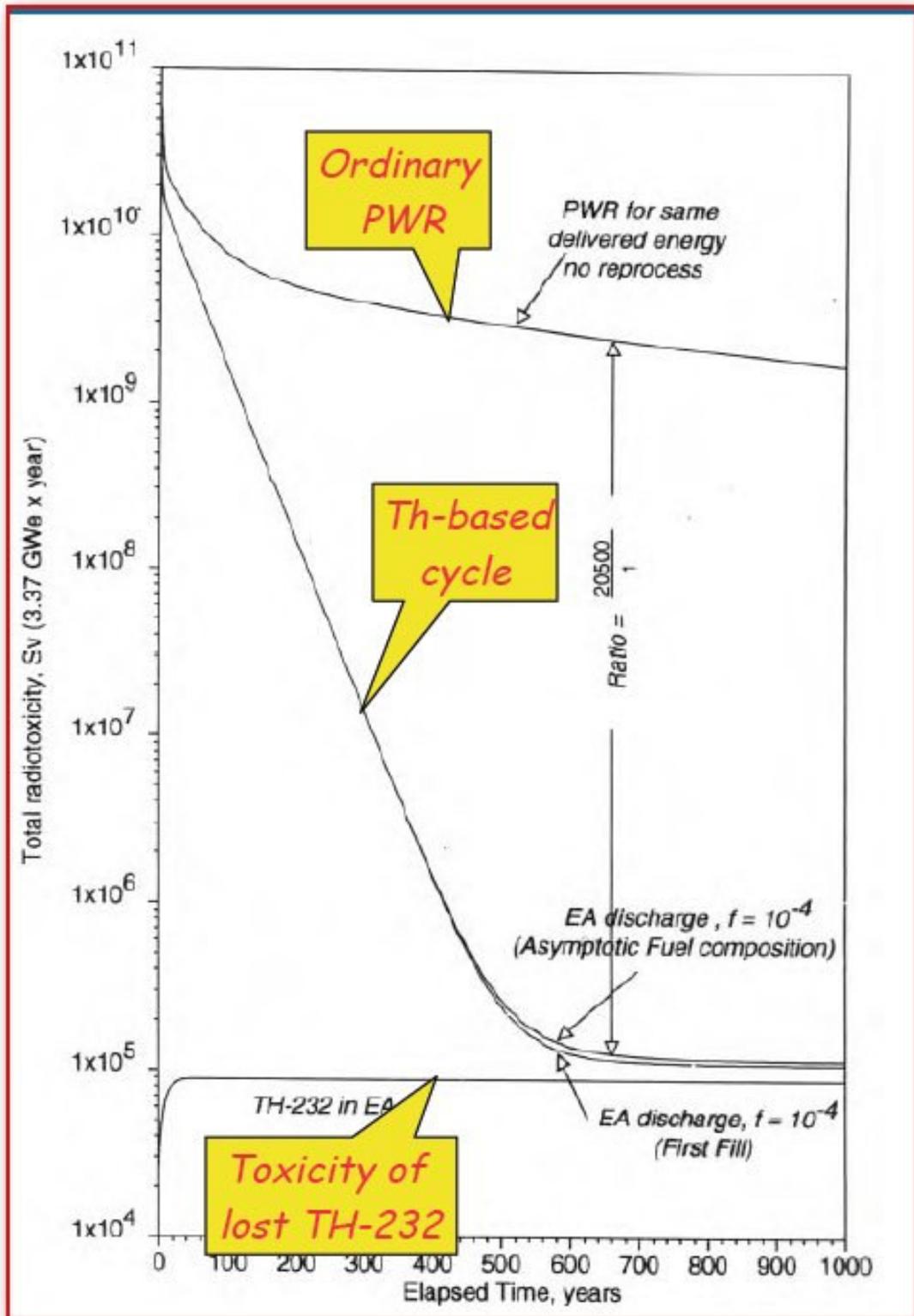
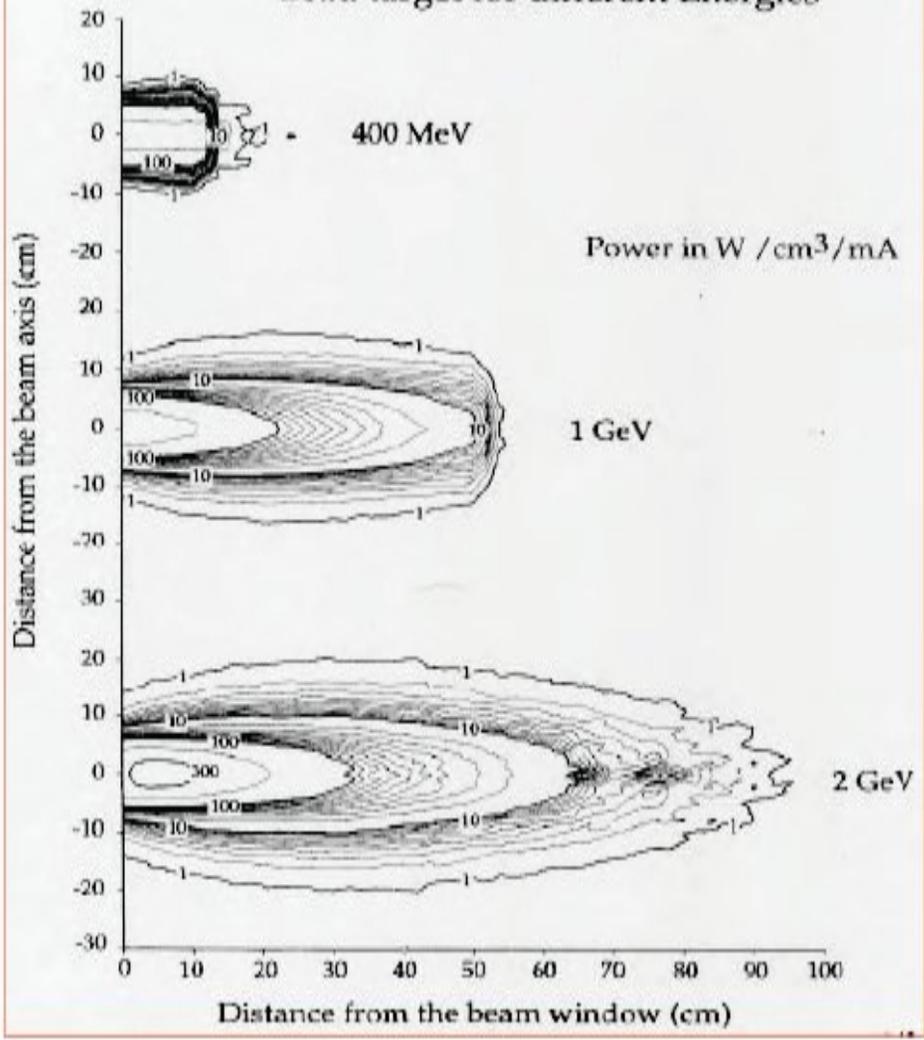


Present beam power $\approx 1 \text{ MWatt}$
 Upgrade to about 3 x foreseen

Proposed high power cyclotron



Power generated by a proton beam in a thick Lead target for different Energies

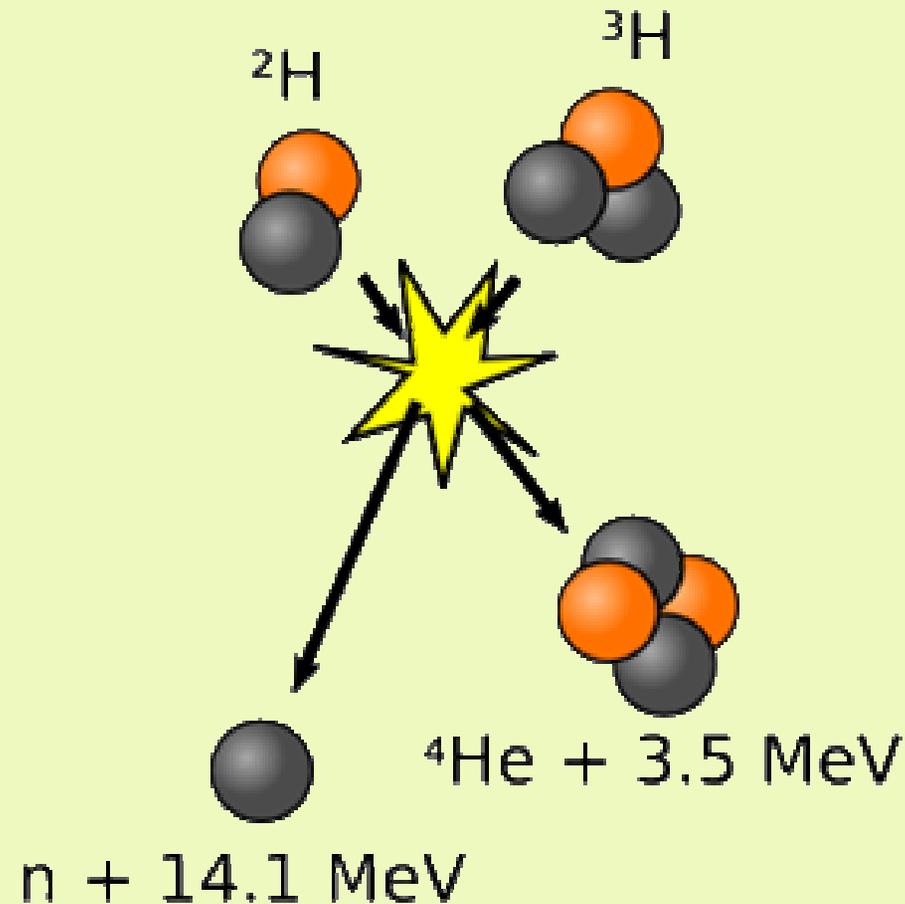


Actuellement

Le projet de C. Rubbia est abandonné.

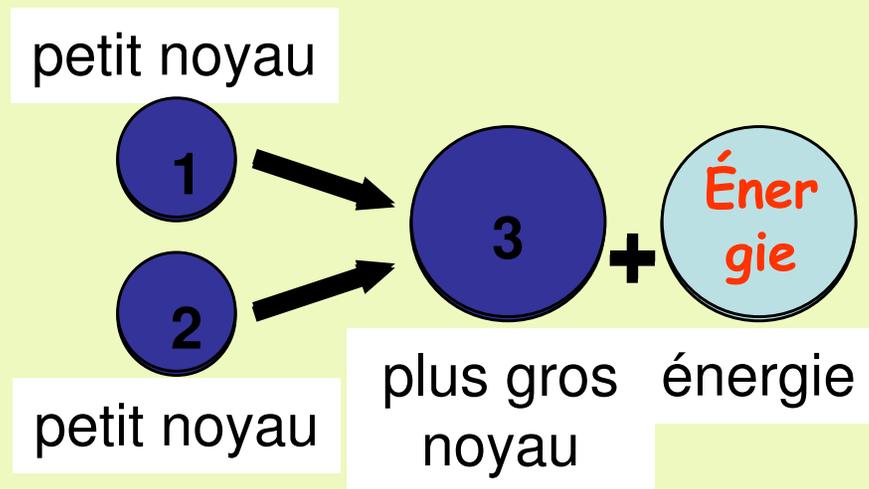
Cette nouvelle technologie demanderait des longues études et essais, et elle ne sera jamais disponible si l'on reste dans l'inaction.

La fusion (Ve génération)



Fusion Nucléaire: Définition

Deux petits (légers) noyaux atomiques fusionnent en un plus gros (plus lourd) noyau atomique, avec dégagement d'énergie.



$$m_1 + m_2 > M_3$$



Équation d'Einstein:
 $E = \Delta mc^2$

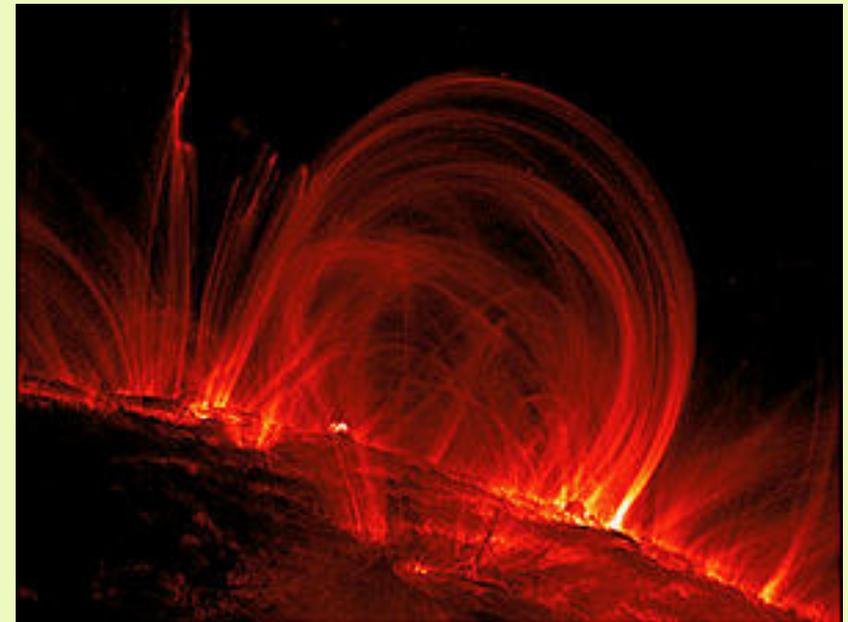
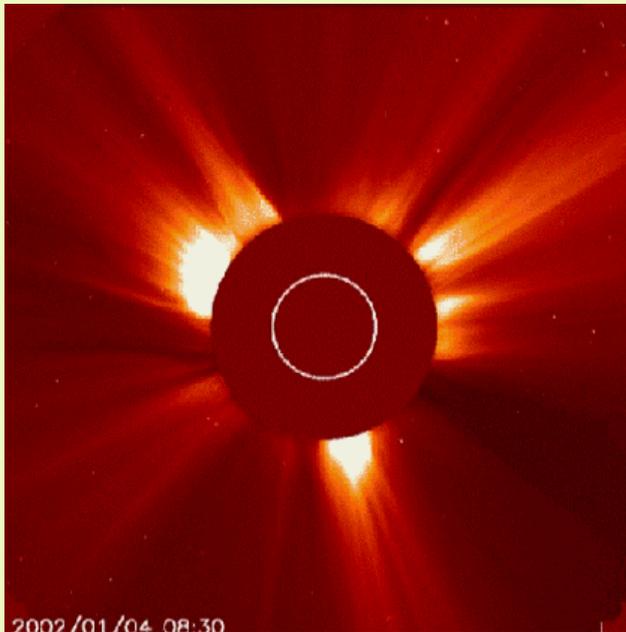
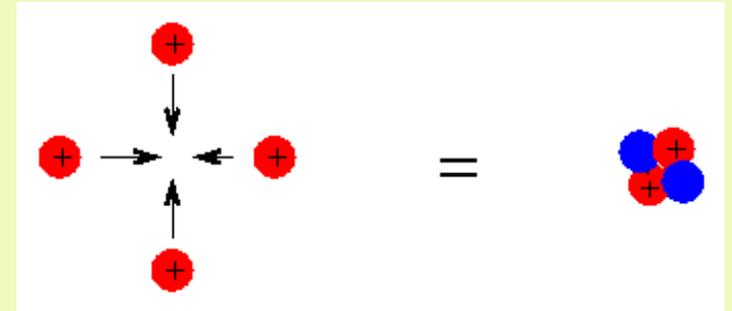
Dans le Soleil $4H \Rightarrow \dots \Rightarrow He(4) + 26.7 \text{ MeV}$

Il y a 4.8 milliards d'années le Soleil entre en activité.

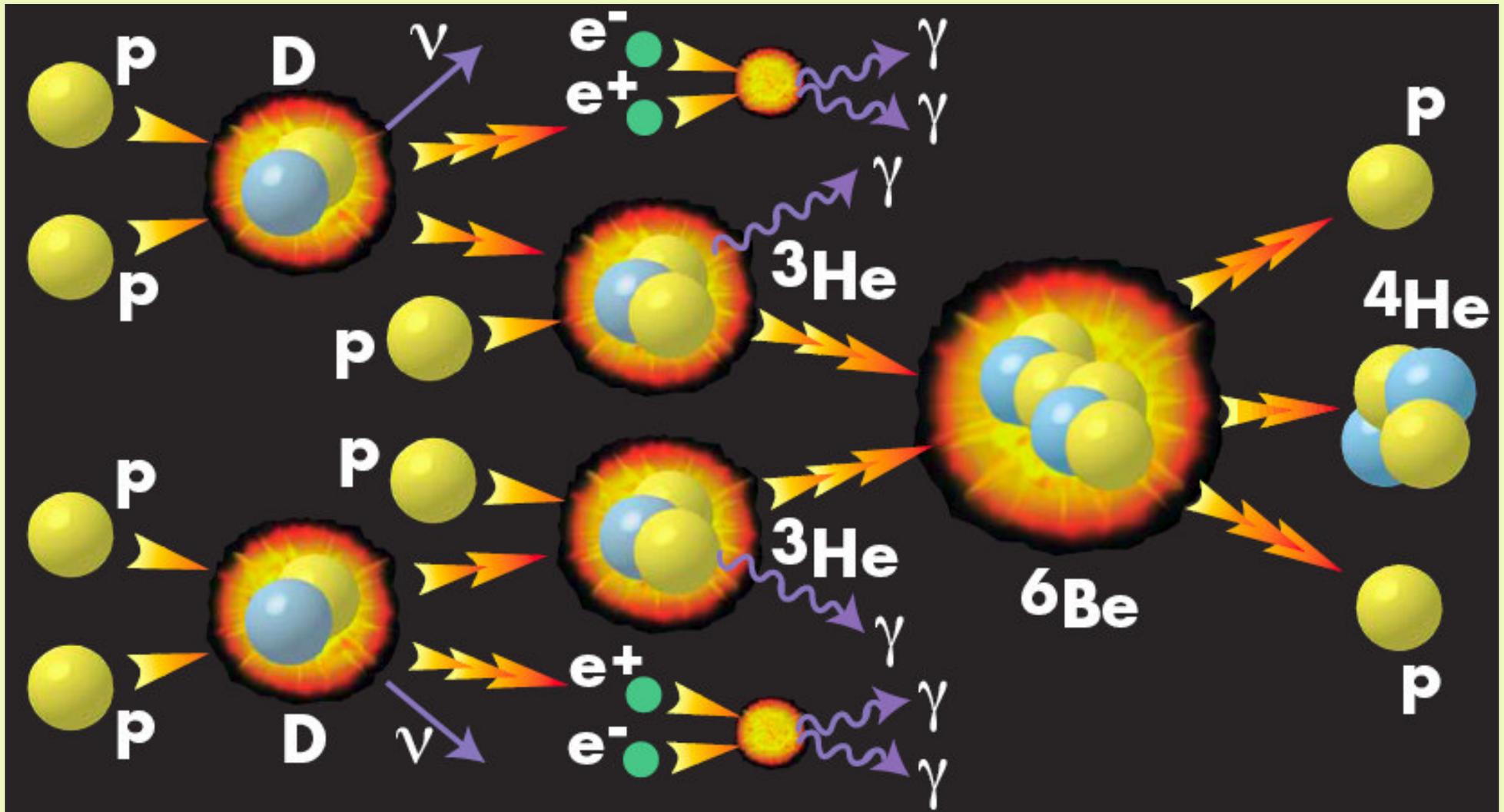
Le centre du disque atteint le seuil de la fusion nucléaire de l'hydrogène



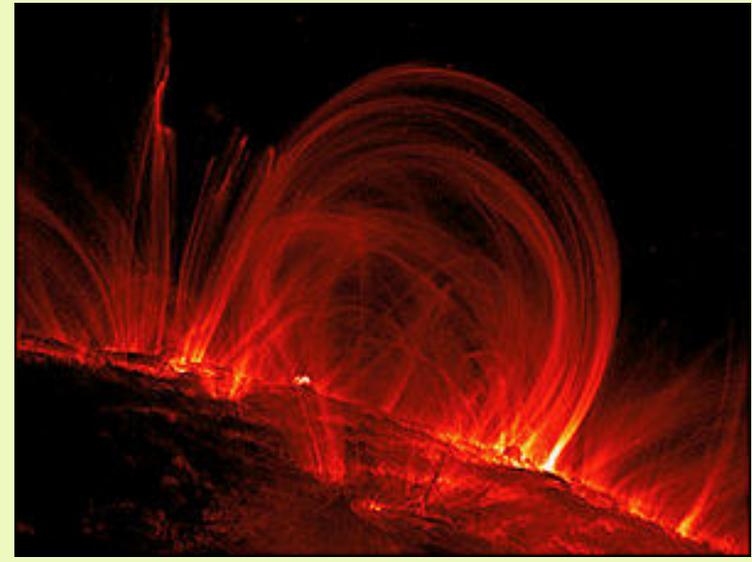
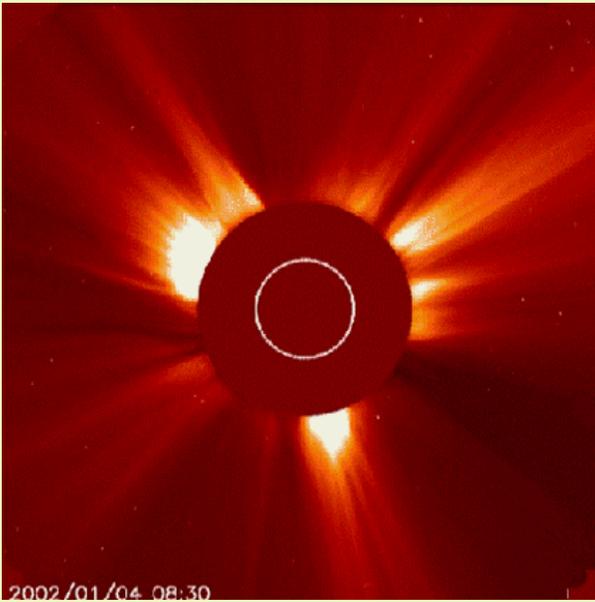
→ ~ 10 millions de degrés
et 100 million d'atmosphères.



Réaction en Chaîne Proton-Proton



Caractéristiques du Soleil



Consommation d'hydrogène:
100 millions de tonnes/sec

Quantité d'hydrogène dans le noyau => 10
milliards d'années de consommation (au début)

Puissance émise : $4 \cdot 10^{26}$ Watt (26 zeros)

Réactions de Fusion sur Terre :
(P ~ 1 atm, T = 100 M°C)

La fusion de 1 gr (Deutérium + Tritium) peut libérer une énergie (thermique) de 100.000 kWh.



Mais, petit problème, le tritium (H-3) n'existe pas naturellement :



(Technique analogue au surgénérateurs : l'élément désiré est généré dans la cuve).

$$1 \text{ eV} \cong 10'000^\circ\text{C}$$

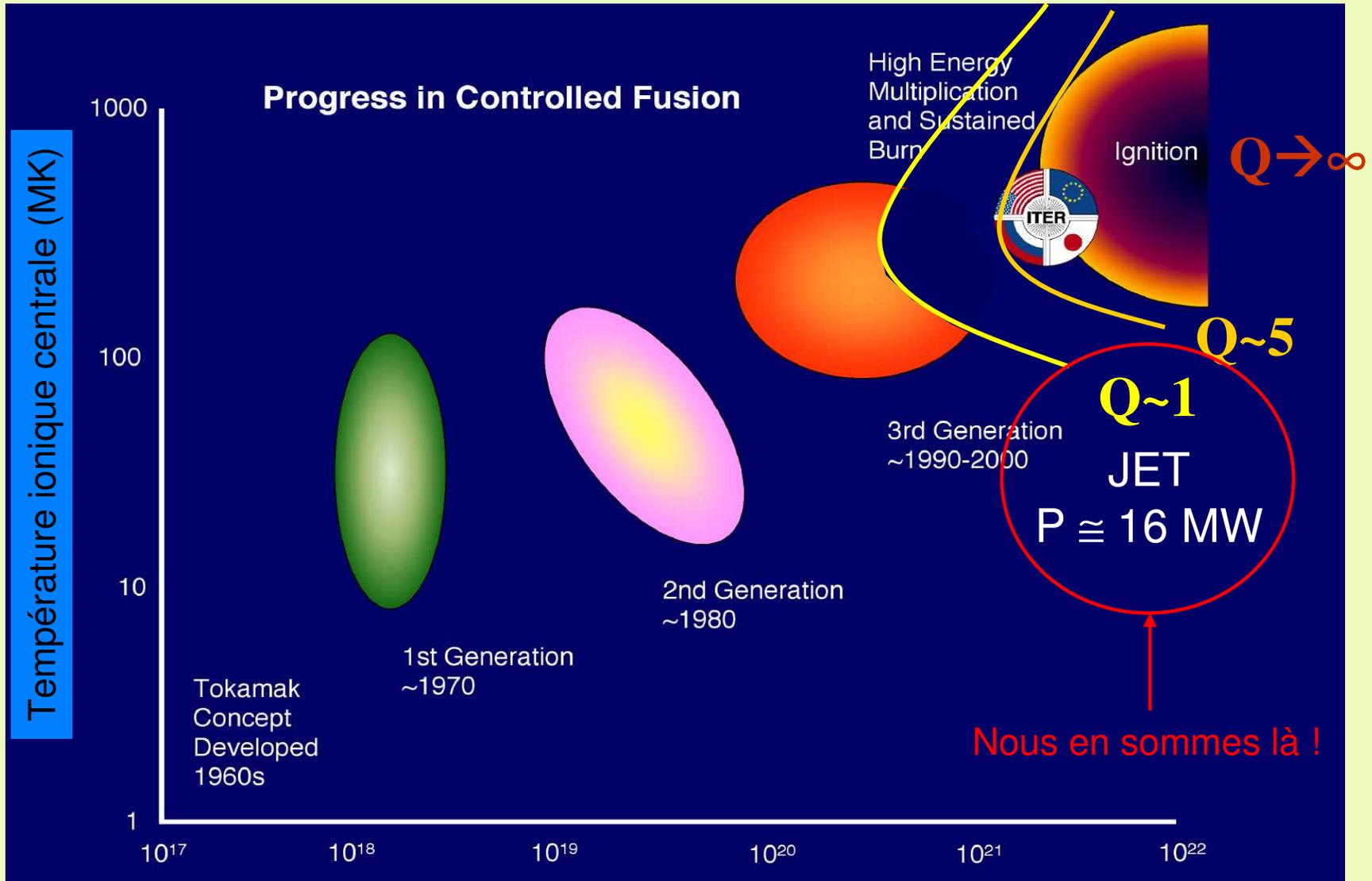
Énergie de la fusion, où en sommes nous après 50 années de recherche et de développement ?

- Rendement (Q) = 0.6 (Q doit être 30 ou plus!)
- Volume du plasma = 90 m³ (2000 m³ nécessaires)
- Puissance = 4 MW pour 4 secondes (devrait être 3 GW sans arrêt)

Et ITER ?

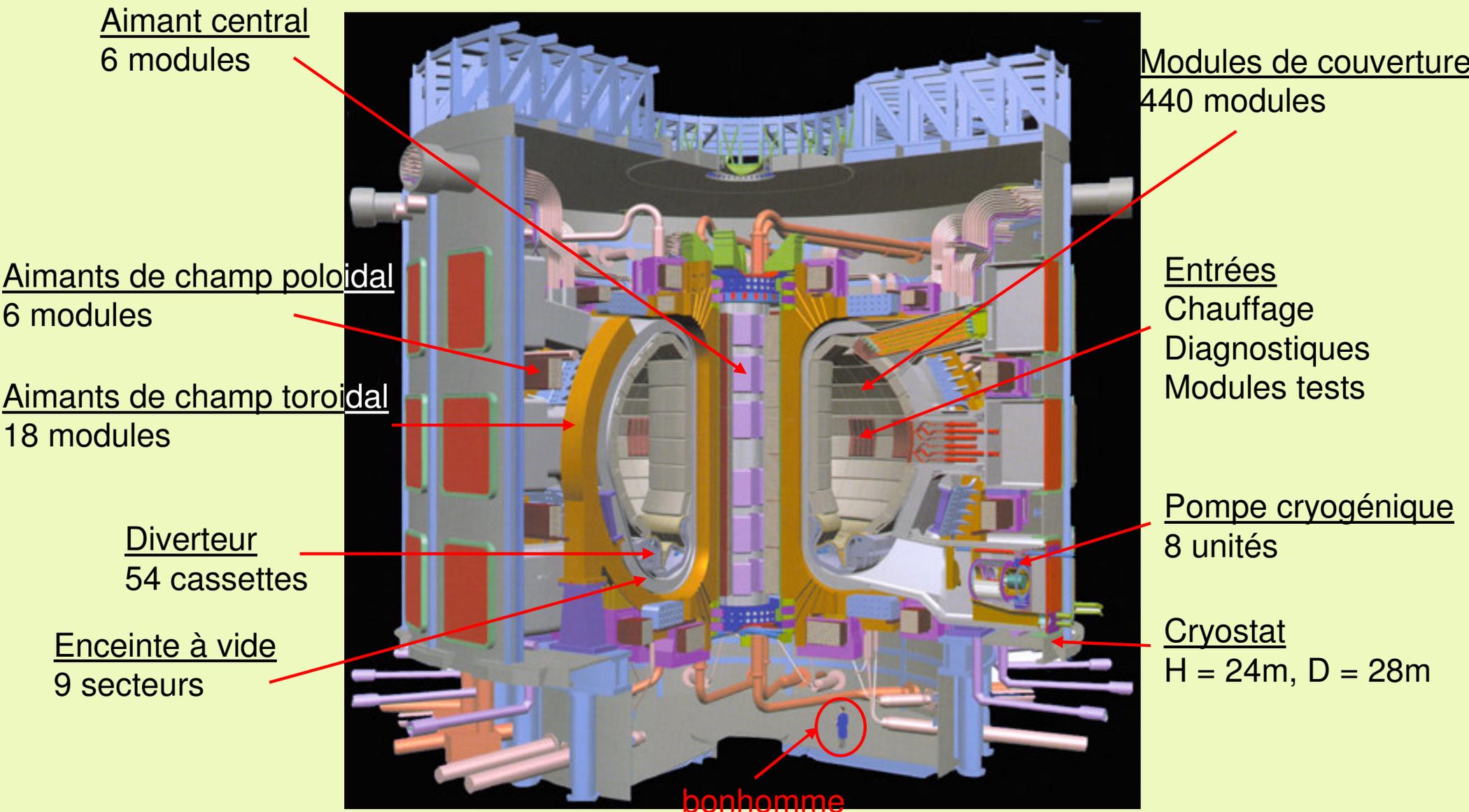
- $Q = 5$
- Volume du plasma = 840 m³
- Puissance = 400 MW pour 2000 sec
- Utilisation du tritium = 20 gr (mais 200 kg par an)

Evolution des Installations de Fusion



Produit triple de fusion = densité (particules/m³) x temps de confinement (s) x température (keV)

ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor



ITER - Répartition des Coûts

Coût de construction \cong 4.7 milliards d'Euros.

Coût d'exploitation sur 20 ans \cong 5.5 milliards d'Euros.

7 partenaires.

Europe	Japon	USA	Fédération de Russie	Chine	Corée du Sud	Inde
50% (40% Europe 10% PACA*)	10%	10%	10%	10%	10%	Contribution en nature ex: personnel

*447 M€

Installation Réellement si Chère ?

Porte-avion de la classe du Nimitz

Installation d'énergie: deux réacteurs nucléaires (4 hélices)

Longueur totale: 332.85 mètres

Largeur du pont d'envol: 76.8 mètres

Chasseurs: 85

Equipage:

- Navire: 3200
- Aviation: 2480

Coût: environ 3.5 milliards d'Euros

USA: plus de 20 navires



Installation Réellement si Chère ?

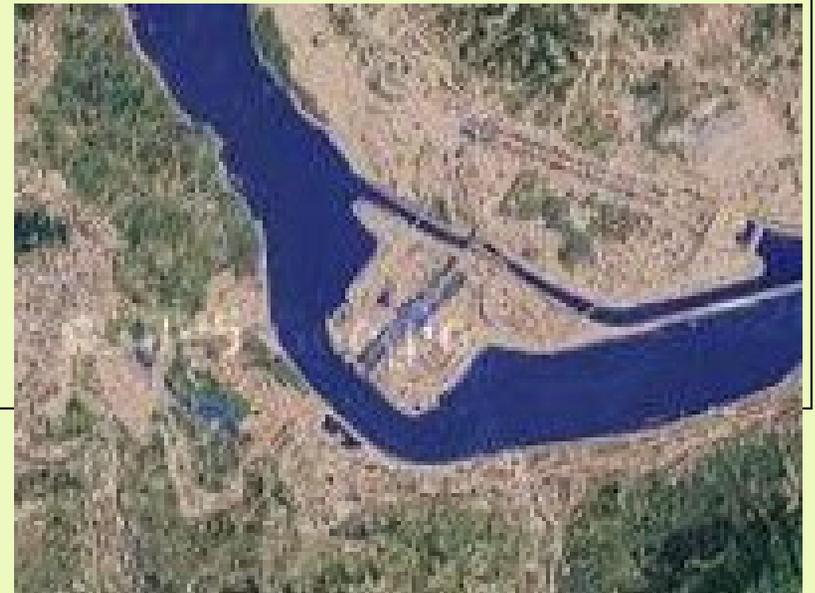
Barrage des Trois Gorges (province de Hubei, Chine)

Longueur: 2'309 m.

Hauteur: 185 m.

Période de construction: 1993-2009. Puissance \cong 18.2 GW.

Coût de construction et de déplacement de la population:
20 milliards d'Euros.



Installation Réellement si Chère ?

Station spatiale internationale (ISS)

1987: Coût de la station estimé à **27** milliards d'Euros.

1995: Coût d'exploitation estimé à **74** milliards d'Euros.

1998: 16 nations participent au projet. Le premier module est mis en orbite.

Longueur: 108 m.

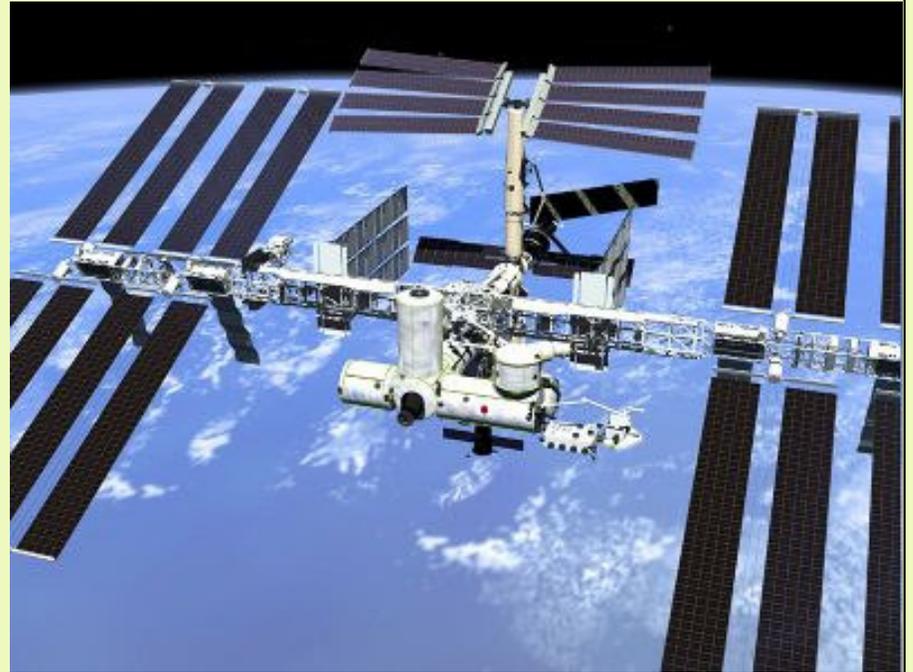
Largeur: 74 m.

Poids: 415 tonnes.

Volume habitable: 1200 m³.

Personnel: 7 astronautes.

Énergie solaire: 110 kW.

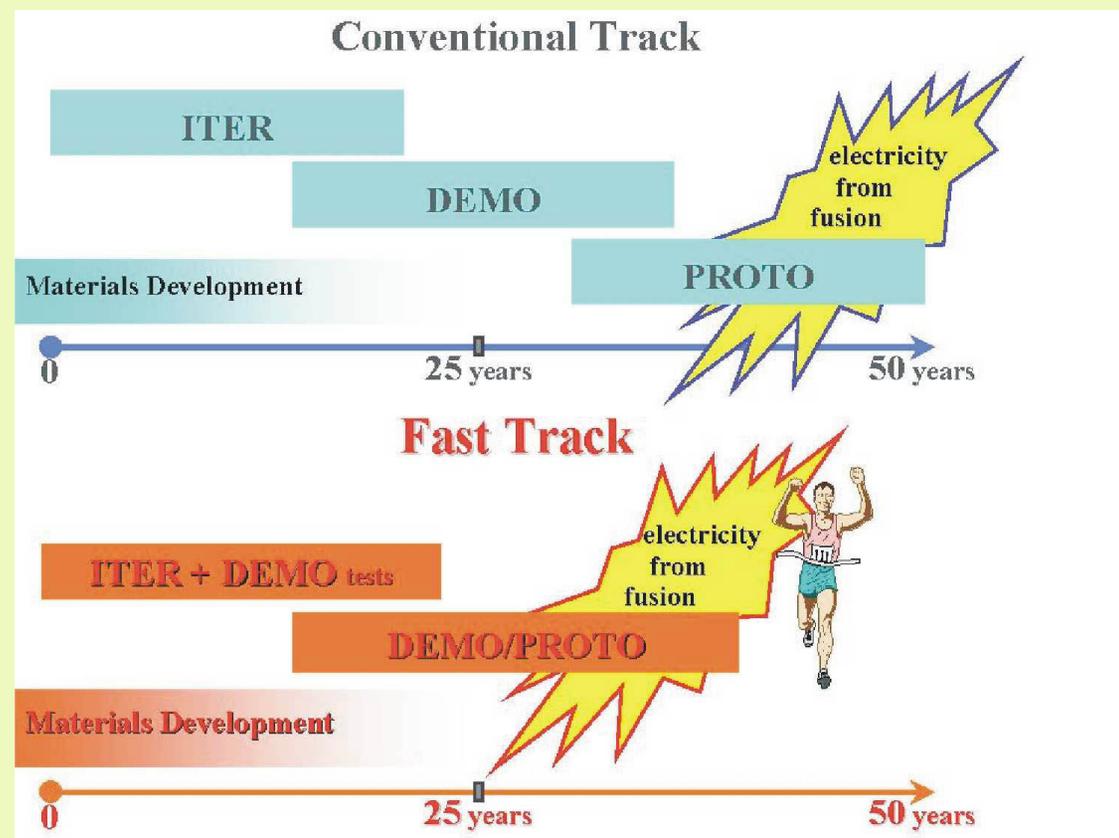


ITER ... et Après ? La Voie Rapide

Voie rapide (Fast Track): un seul concept DEMO/PROTO remplace DEMO+PROTO.

DEMO/PROTO: démonstration de la production d'électricité au moyen de la fusion.

Il ne faut pas perdre de vue qu'il faudrait remplacer les combustibles fossiles en 50-75 ans.



Plan (rose) de la fusion en Europe

ITER (500 MW × 2000 s, test de production du Tritium)	2010 - 2030
DEMO - démonstration (2000MW _{therm}) un peu d'électricité et auto-suffisance en tritium.	2020? - 2040?
PROTO - prototype de centrale commerciale (électrique 1500 MW électriques)	2040? - 2060?
Centrales de série	2060 →

Quelques critiques sur le projet ITER

- Comprendre la physique du Plasma est un projet de recherche. La machine ITER est en fait un grand instrument de recherche fondamentale.
- Le niveau de radioactivité en cas de fuite ou démantèlement est à peine inférieur que pour un réacteur actuel - le Tritium est un isotope radioactif ($\tau \sim 13$ ans) de l'hydrogène.
- Les risques du réfrigérant Lithium sont les mêmes que pour le Sodium de Superphœnix.
- *Il ne faudrait pas tout miser sur un révolutionnaire moteur de course sans s'assurer qu'on aura des pneus et de l'essence pour rouler.*