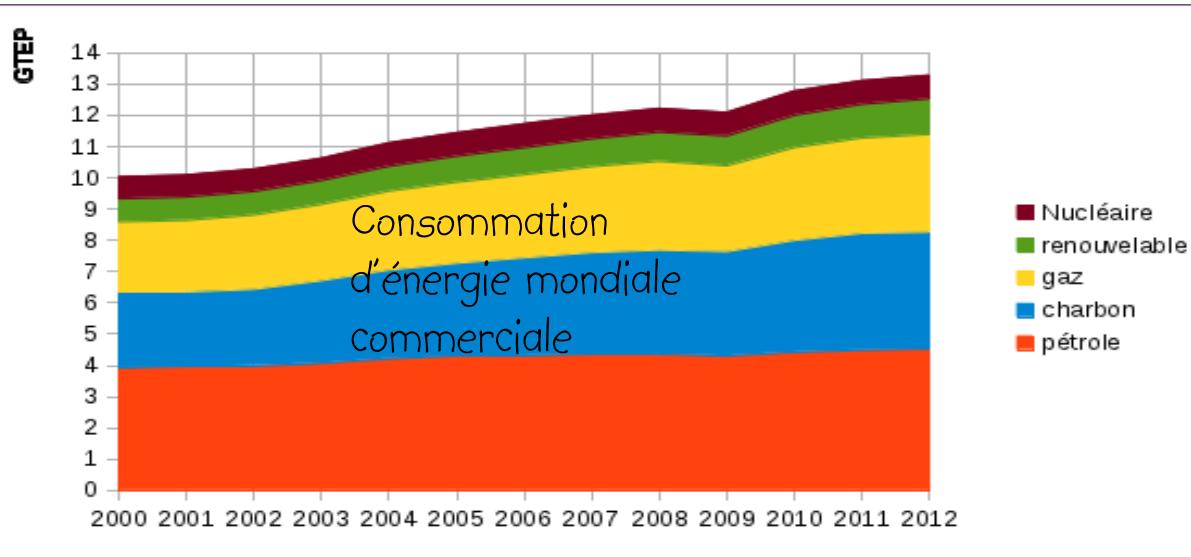


# Notions de physique et d'ingénierie nucléaires

## Cours 5 : Énergie nucléaire : prospectives

# Besoins énergétiques mondiaux



Consommation annuelle mondiale : 13,3 Gtep en 2012.

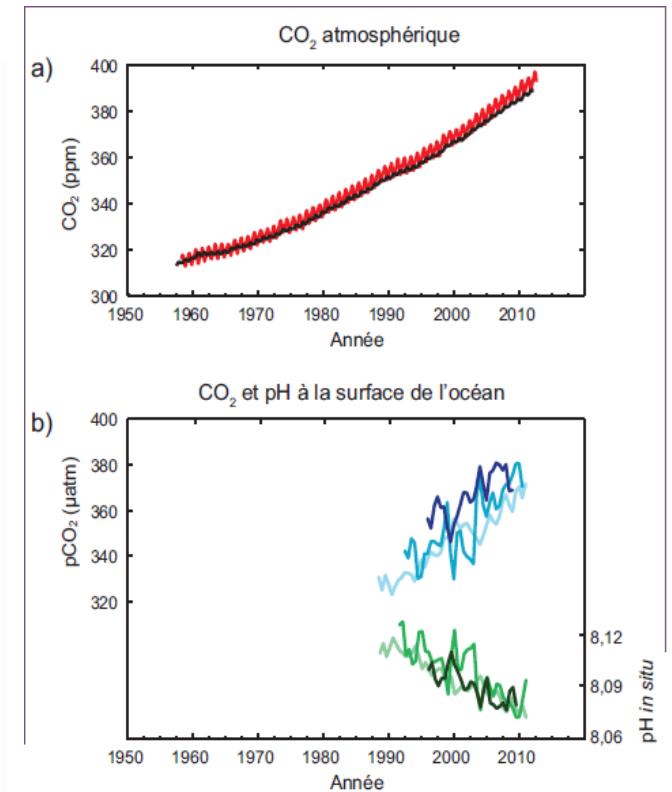
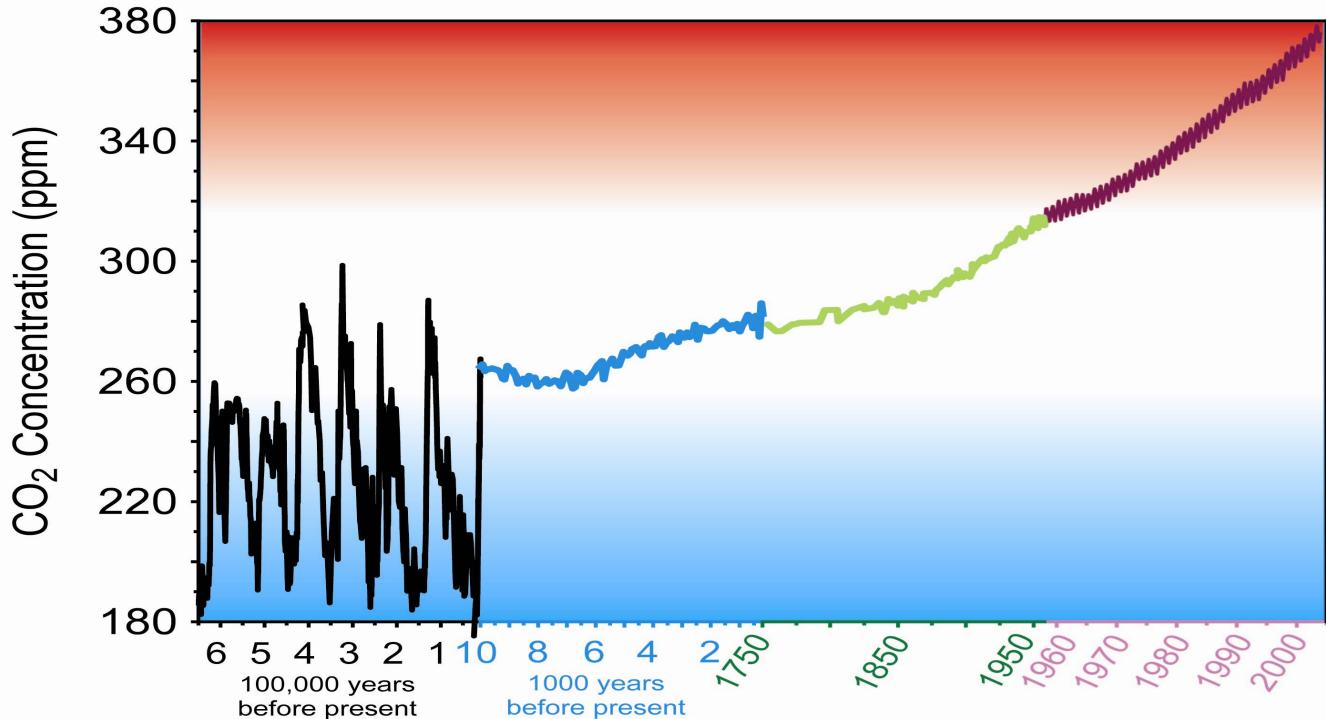
Consommation annuelle de la France : 272 Mtep en 2011 dont ~50% sont utilisés pour produire de l'électricité.

La consommation mondiale augmente de plus de 2,3% par an c-à-d 1,1 fois la consommation de la France.

l'hydroélectricité constitue l'essentiel de l'énergie renouvelable commerciale. Les autres énergies renouvelables commerciales ne sont pas représentées car leurs parts sont encore très faibles. On estime cependant que la biomasse ajoute une contribution d'environ 10% de plus au total commercial. Elle n'est pas représentée ici.

$$1 \text{ tep} = 10^{10} \text{ calories} = 4,2 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

# Concentration en $\text{CO}_2$ de l'atmosphère



# Émission de $\text{CO}_2$ d'origine anthropique

Taux annuel d'émission en 2013 : 36,1 Gt de  $\text{CO}_2$ .

Taux de croissance annuelle d'émission de  $\text{CO}_2$  entre 2000 et 2009 : 2,5% / an  
contre 1% / an dans la décennie précédente.

37% de plus qu'en 1990 année de référence du protocole de Kyoto

Taux annuel d'émission par habitant : 5,5 t en Chine, 10 t en Europe, 17 t aux USA  
5,5 t en France et 4,6 t en moyenne dans le monde.



Planisphère de l'intensité des émissions de  $\text{CO}_2$ .

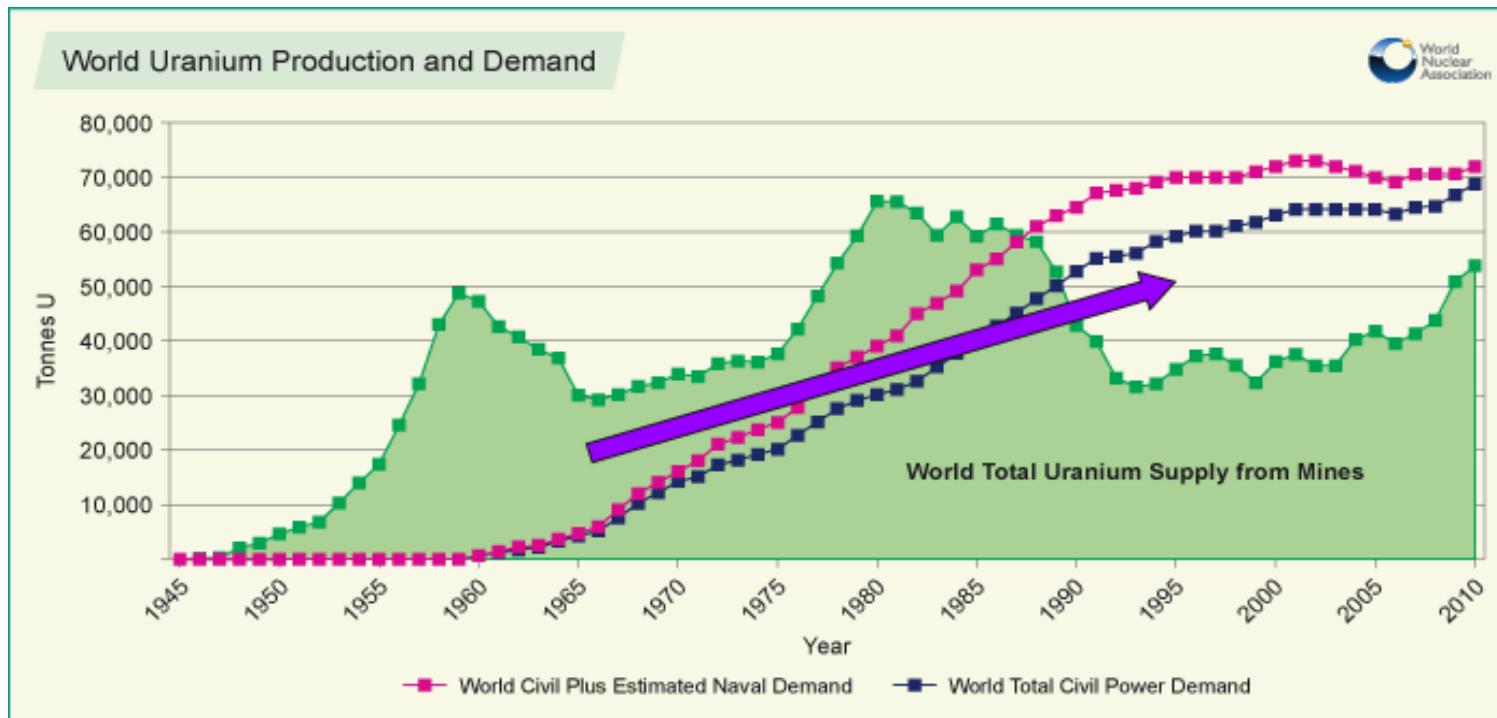
## La part du nucléaire dans le futur ?

Aujourd'hui, l'énergie nucléaire représente environ 6 % de la consommation énergétique primaire mondiale commerciale, pour 450 réacteurs installés dans le monde.

Si on voulait que l'énergie nucléaire passe à 60% de la production mondiale, il faudrait aujourd'hui découpler le nombre de réacteurs , soit un nombre total de 4000-5000 réacteurs.

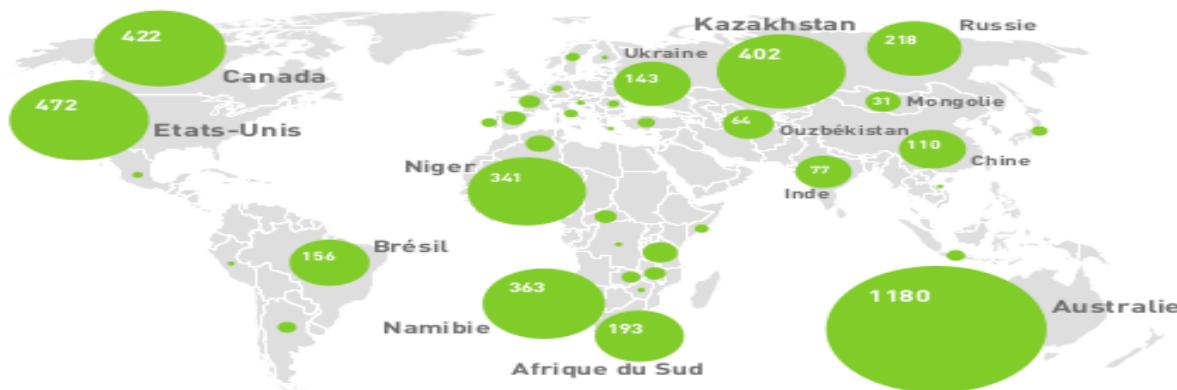
Est-ce réaliste ?

# Production et demande annuelles d'uranium dans le monde



# Extraction minière

## Réserves mondiales d'uranium en 2011 (en milliers de tonnes d'uranium)



Source: OCDE/AIEA, «Red Book» 2011

On estime qu'il y aurait environ 16 millions de tonnes d'U dans les réserves exploitables à un coût inférieur à 300 \$/kg dans le monde. Soit environ 250 ans de stock au rythme de consommation actuel, mais moins de 30 ans si l'on devait décupler le nombre de réacteurs.

Actuellement 70 000 t d'U consommées par an

# Économie (non spéculative) de l'énergie

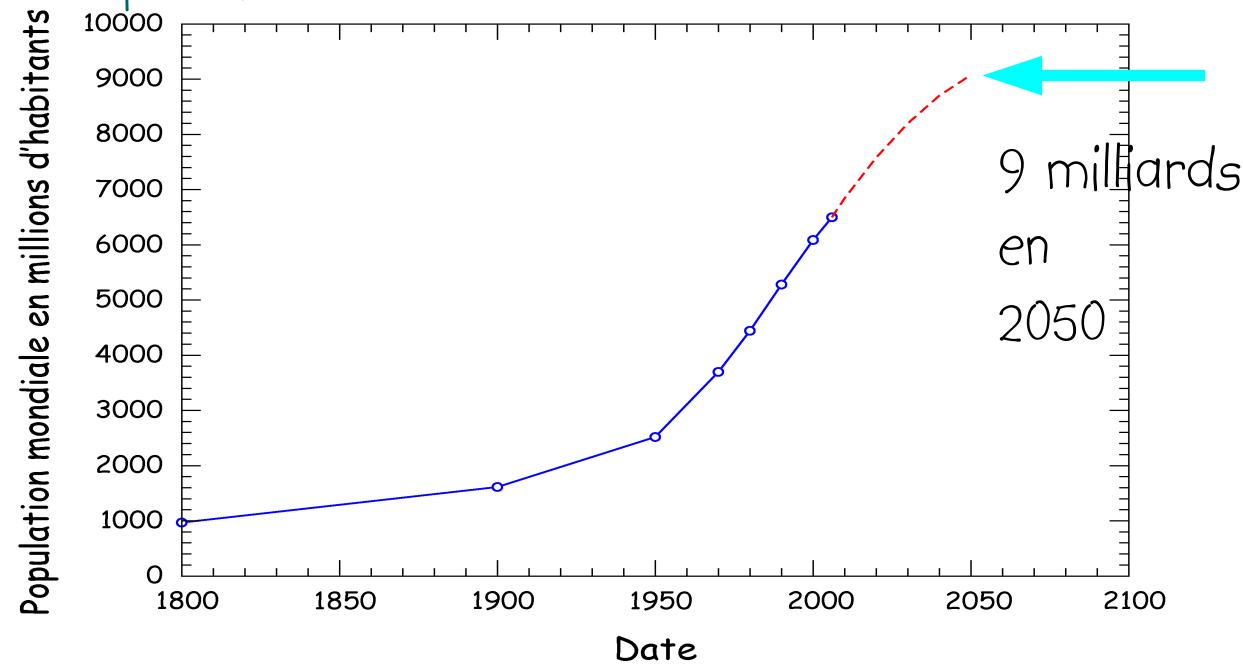
La consommation énergétique mondiale annuelle peut s'écrire sous la forme de fractions ayant un sens démographique et économique :

$$\text{Energie} = \frac{\text{Energie}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{Population}} \times \text{Population Mondiale}$$

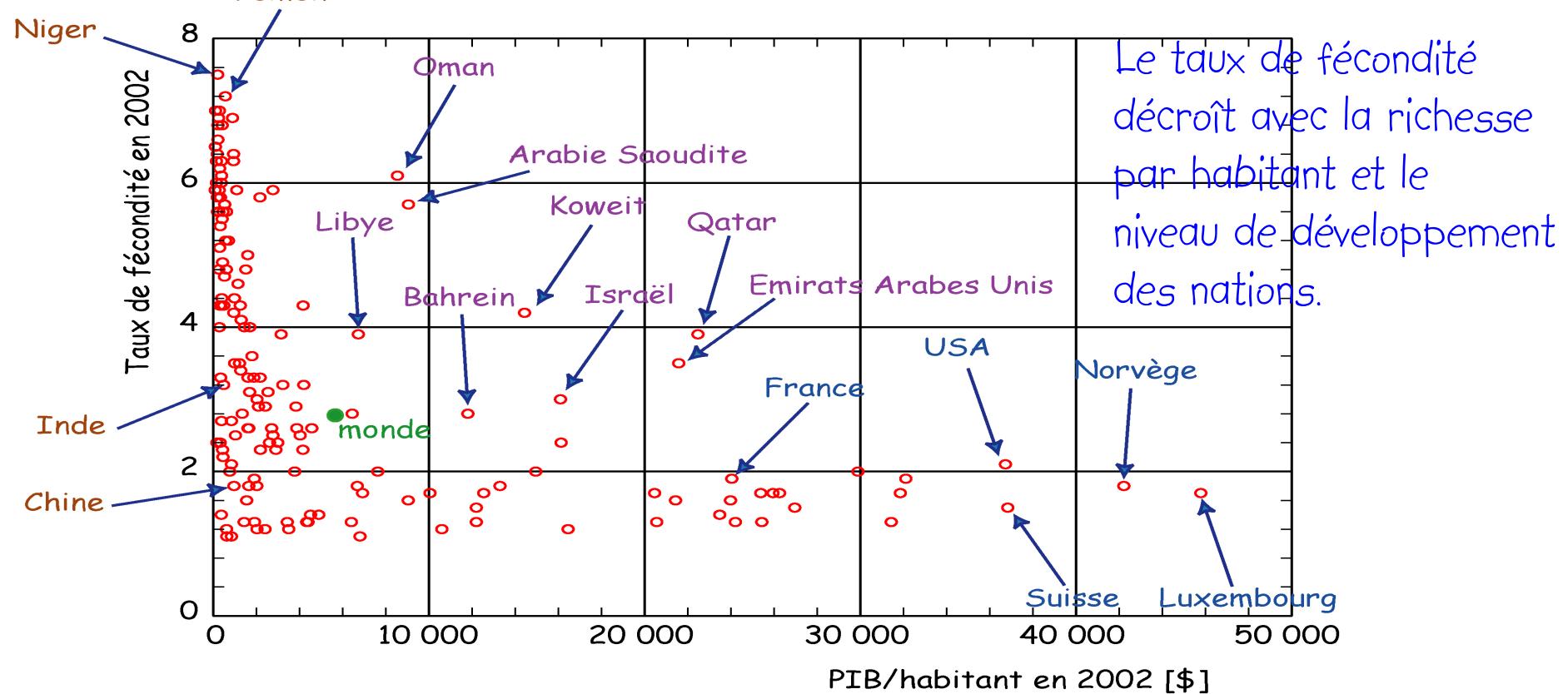
efficacité énergétique mondiale

Population X 1,3 en 2050

PIB/habitant dans le monde



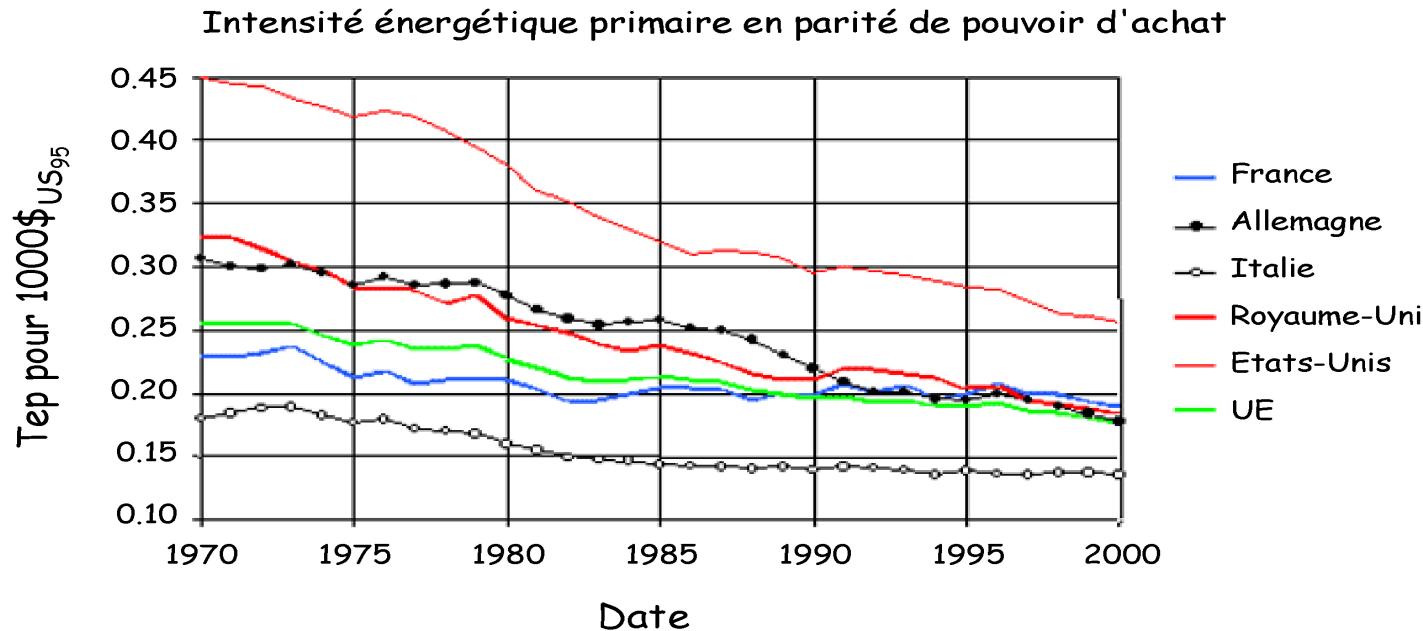
# Économie (non spéculative) de l'énergie



Difficile d'évaluer l'accroissement du PIB/habitant sur 50 ans !

Accroissement d'un facteur 3 : 2,22 %/an

# Économie (non spéculative) de l'énergie



L'intensité (l'efficacité) énergétique s'améliore au cours du temps.  
On admettra que globalement celle-ci pourrait être divisée par deux  
dans le monde dans les 50 prochaines années.

# Économie de l'énergie

$$\text{Energie} = \frac{\text{Energie}}{\text{PIB}} \times \frac{\text{PIB}}{\text{Population}} \times \text{Population}$$

↓      ↓      ↓

0,5      3      X      1,3      =      2

(amélioration de l'efficacité énergétique mondiale)

Ce petit calcul montre qu'un doublement de la consommation énergétique annuelle mondiale d'ici à 2050 est tout à fait plausible.

Si l'on maintenait les mêmes sources d'énergie primaire qu'aujourd'hui, cela nous conduirait à accroître de plus de 4 ppm /an la concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère avec un passage au-dessus de 700 ppm au cours du siècle.

Est-on prêt à prendre ce risque ?

## La part du nucléaire dans le futur ?

Aujourd’hui, l’énergie nucléaire représente environ 6 % de la consommation énergétique primaire mondiale commerciale, pour 450 réacteurs installés dans le monde.

Si on voulait que l’énergie nucléaire passe à 60% de la production mondiale, il faudrait aujourd’hui découpler le nombre de réacteurs , soit un nombre total de 4000-5000 réacteurs.

Est-ce réaliste ?

Uniquement si l’on devait passer à un mode de sur-génération du combustible et consommer la totalité de l’U (238 et 235) ou/et le  $^{232}\text{Th}$  .

# Facteur de multiplication dans un milieu comportant de la matière fissile

Pour faire un réacteur, il faut que  $\eta_c > 1$  et on ajuste ensuite  $\omega$  pour que  $k$  soit égal à 1. Rappel :  $\omega$  dépend de la structure et de la composition du milieu.

Si  $\eta_c > 2$  pour chaque génération, on peut utiliser un neutron pour faire une nouvelle fission et un autre neutron pour produire un noyau fissile à partir de  $^{232}\text{Th}$  ou  $^{238}\text{U}$  : c'est un sur-générateur.

Dans ce diagramme, on observe que l'on peut aisément faire un réacteur à neutrons thermiques utilisant de l' $^{235}\text{U}$  ou du  $^{239}\text{Pu}$ , et que l'on peut en principe réaliser un sur-générateur à neutrons rapides fonctionnant avec des mélanges :  $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$  ou  $^{238}\text{U}$ - $^{239}\text{Pu}$ .

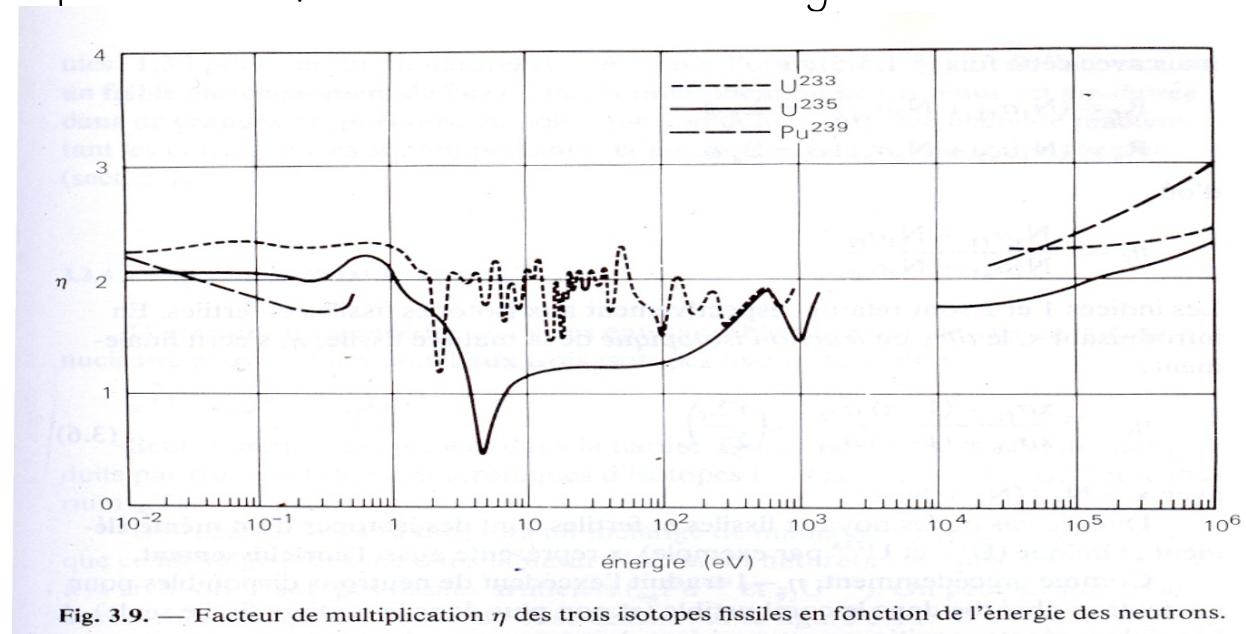
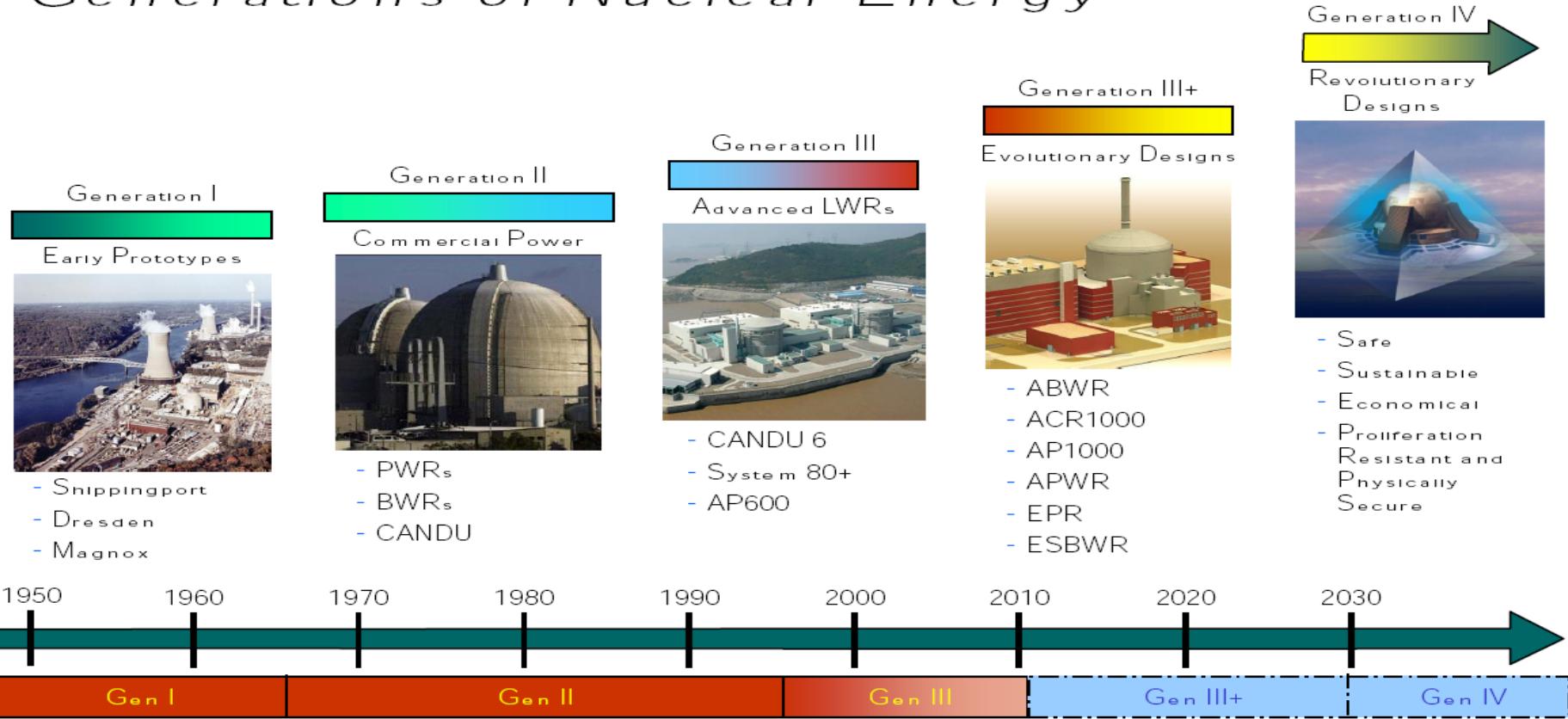


Fig. 3.9. — Facteur de multiplication  $\eta$  des trois isotopes fissiles en fonction de l'énergie des neutrons.

# Generations of Nuclear Energy



# Generation IV Goals

## Sustainability

1. Generate energy sustainably, and promote long-term availability of nuclear fuel
2. Minimize nuclear waste and reduce the long term stewardship burden

## Safety & Reliability

3. Excel in safety and reliability
4. Have a very low likelihood and degree of reactor core damage
5. Eliminate the need for offsite emergency response

## Economics

6. Have a life cycle cost advantage over other energy sources
7. Have a level of financial risk comparable to other energy projects

## Proliferation Resistance & Physical Protection

8. Be a very unattractive route for diversion or theft of weapons-usable materials, and provide increased physical protection against acts of terrorism

- *Six systems were selected:*
  - Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)
  - Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)
  - Molten Salt Reactor (MSR)
  - Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)
  - Supercritical-Water Reactor (SCWR)
  - Very-High-Temperature Reactor (VHTR)

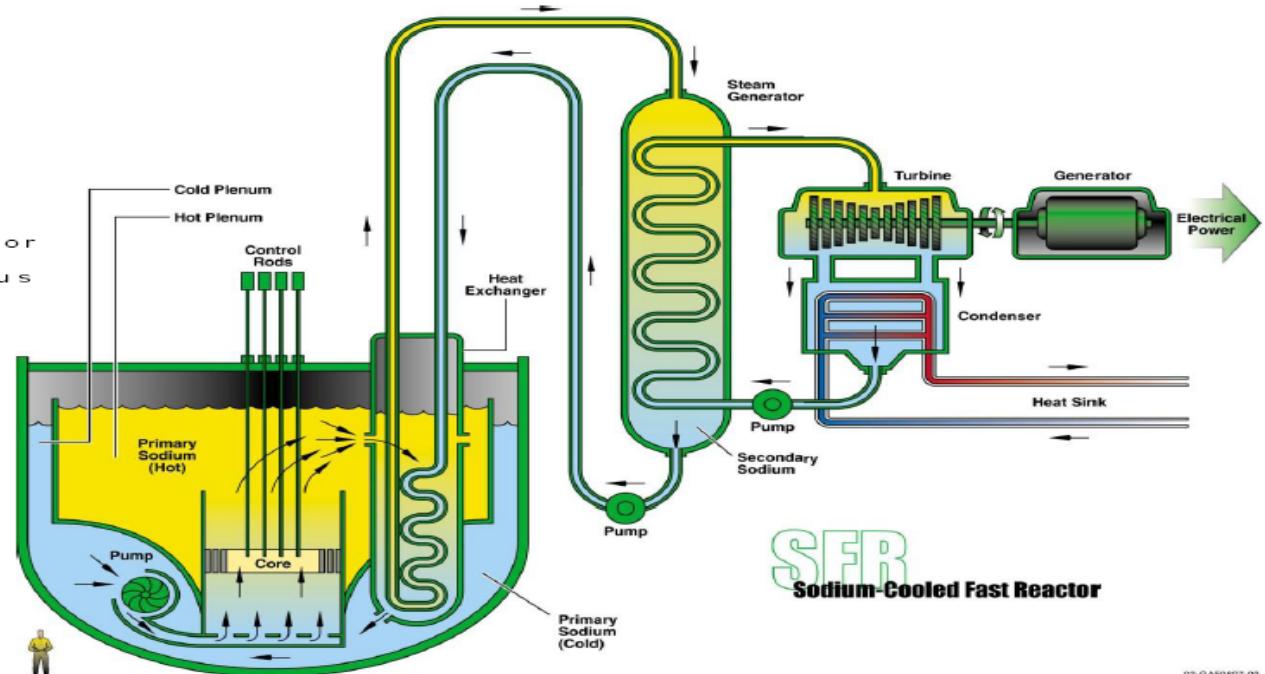
# Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)

## Characteristics

- Sodium coolant
- 550°C outlet temperature
- 600-1500 MW<sub>e</sub> large size, or
- 300-600 MW<sub>e</sub> intermediate size
- 50 MW<sub>e</sub> small module option
- Metal fuel with pyroprocessing or MOX fuel with advanced aqueous separation

## Benefits

- High thermal efficiency
- Consumption of LWR actinides
- Efficient fissile material generation



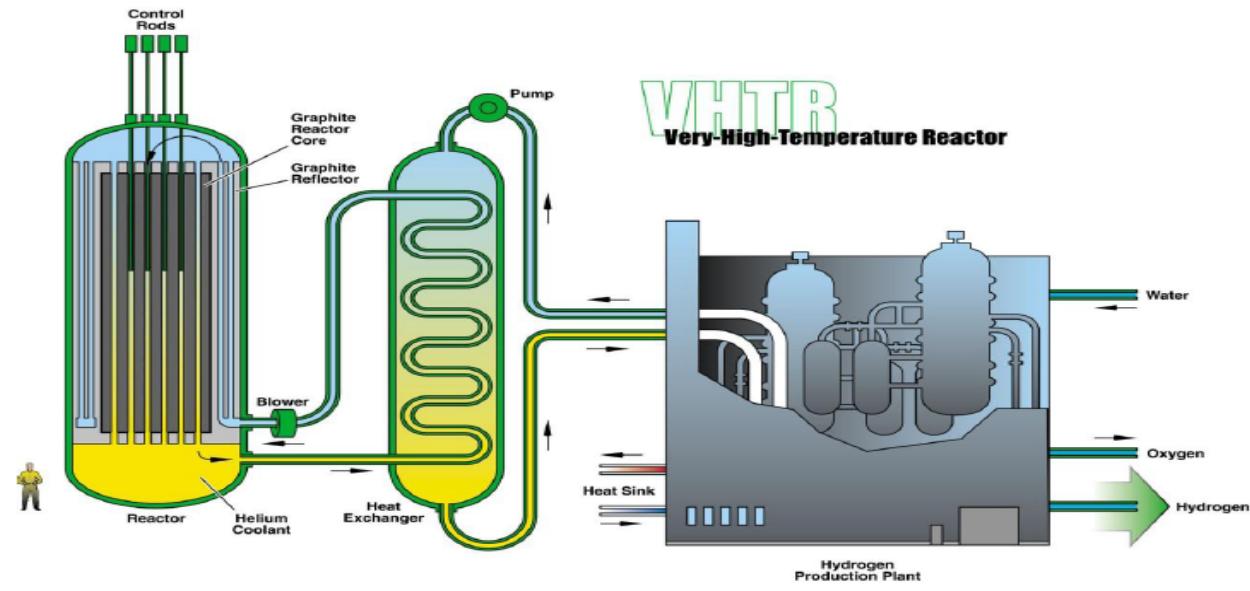
# Very-High-Temperature Reactor (VHTR)

## Characteristics

- He coolant
- >900°C outlet temperature
- 250 MW<sub>e</sub>
- Coated particle fuel in either pebble bed or prismatic fuel

## Benefits

- Hydrogen production
- Process heat applications
- High degree of passive safety
- High thermal efficiency option



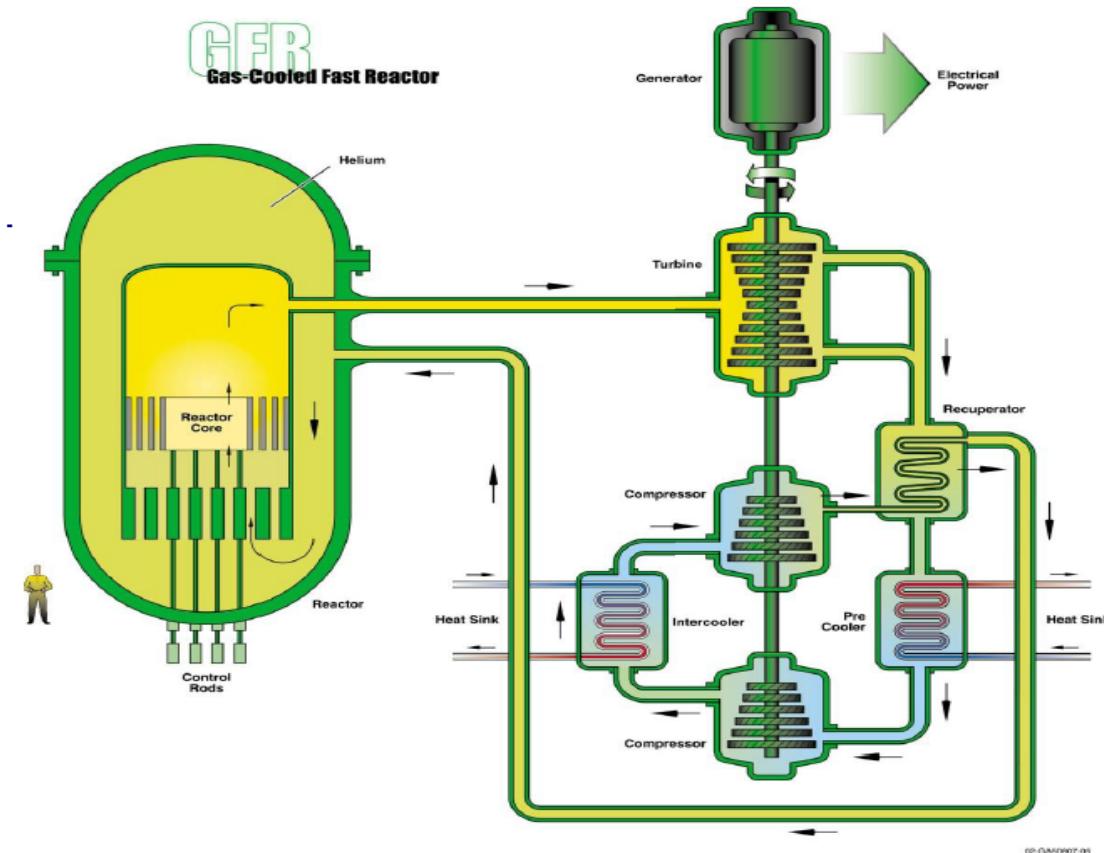
# Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)

## Characteristics

- He coolant
- 850°C outlet temperature
- Direct gas-turbine cycle or supercritical CO<sub>2</sub> cycle with optional combined cycles
- 2400 MW<sub>th</sub> / 1100 MW<sub>e</sub>
- Several fuel options
  - Carbide in plates or pins
  - Nitride
  - Oxide

## Benefits

- High efficiency
- Waste minimization and efficient use of uranium resources



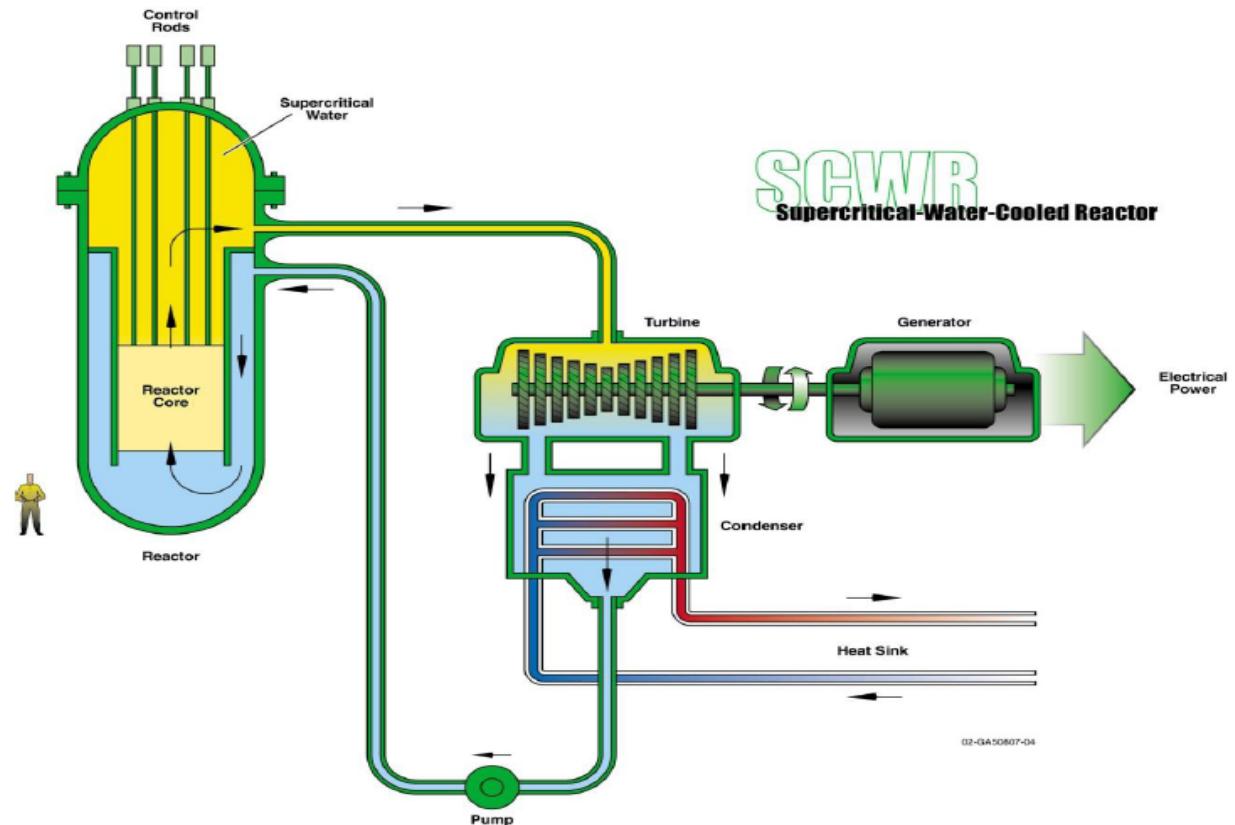
# Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)

## Characteristics

- Water coolant above supercritical conditions (374°C, 22.1 MPa)
- 510-625°C outlet temperature
- 1500 MW<sub>e</sub>
- Pressure tube or pressure vessel options
- Simplified balance of plant

## Benefits

- Efficiency near 45% with excellent economics
- Leverages the current experience in operating fossil-fueled supercritical steam plants
- Configurable as a fast- or thermal-spectrum core



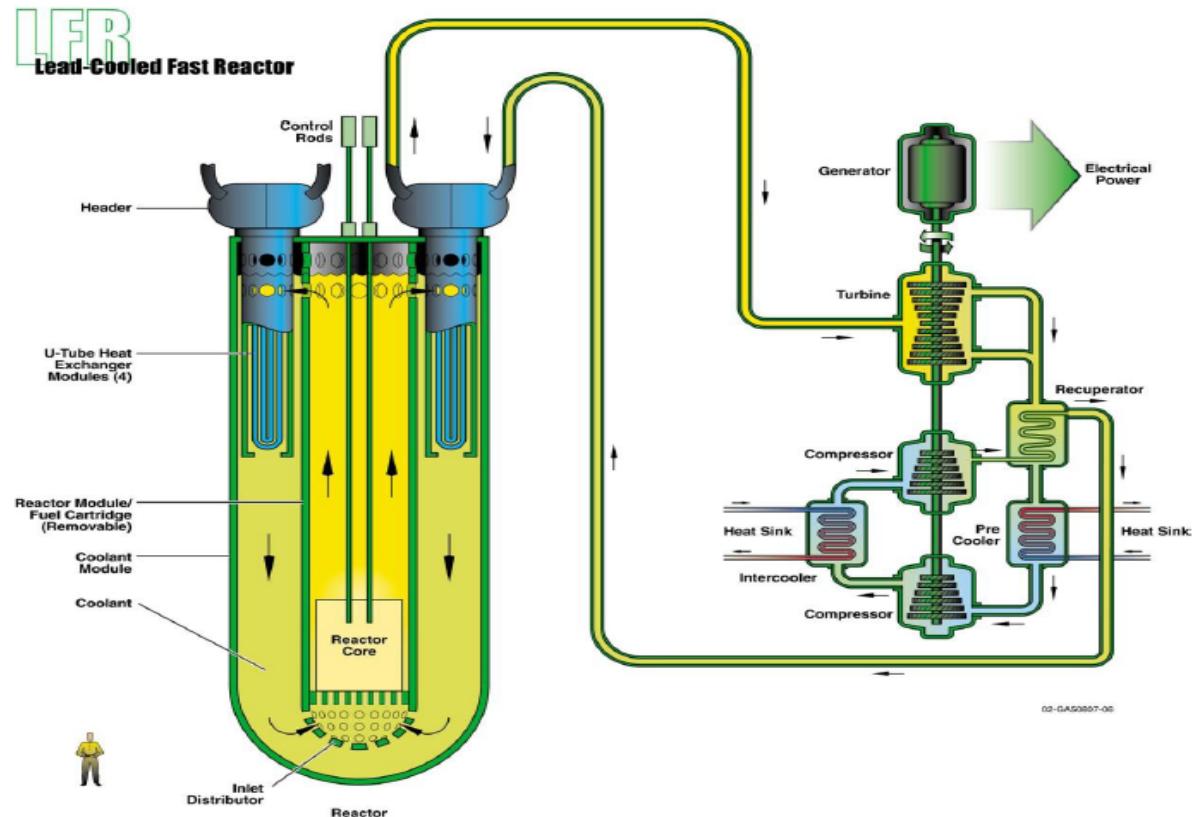
# Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)

## Characteristics

- Pb or Pb/Bi coolant
- 550°C to 800°C outlet temperature
- Small transportable system 50-150 MWe, and
- Larger station 300-1200 MWe
- 15-30 year core life option

## Benefits

- Distributed electricity generation
- Hydrogen and potable water
- Replaceable core for regional fuel processing
- High degree of passive safety
- Proliferation resistance through long-life core



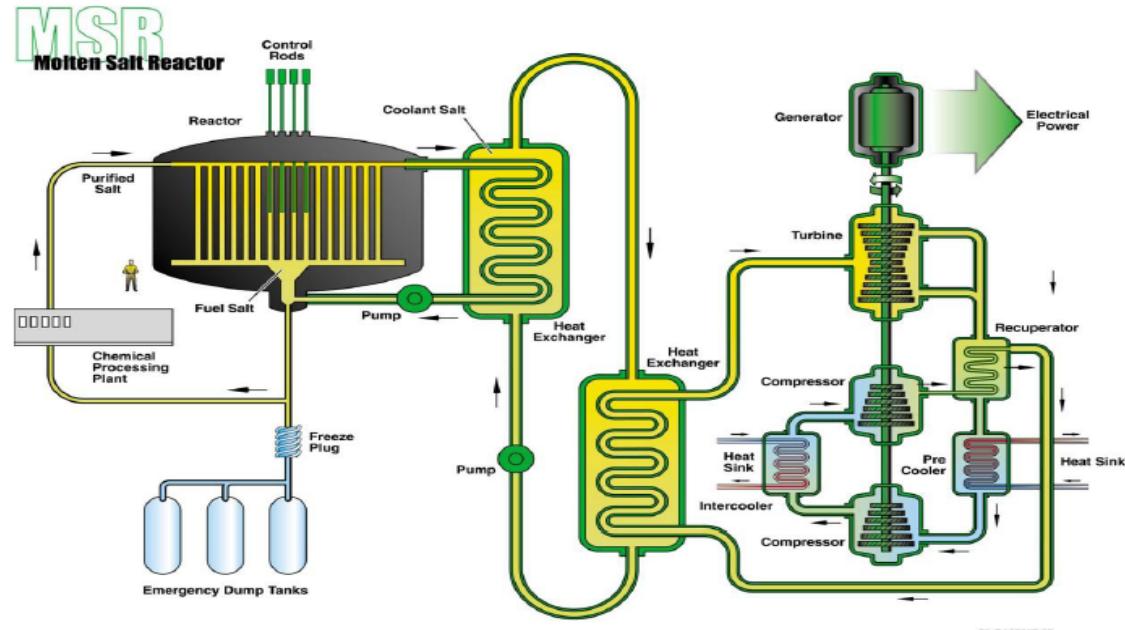
# Molten Salt Reactor (MSR)

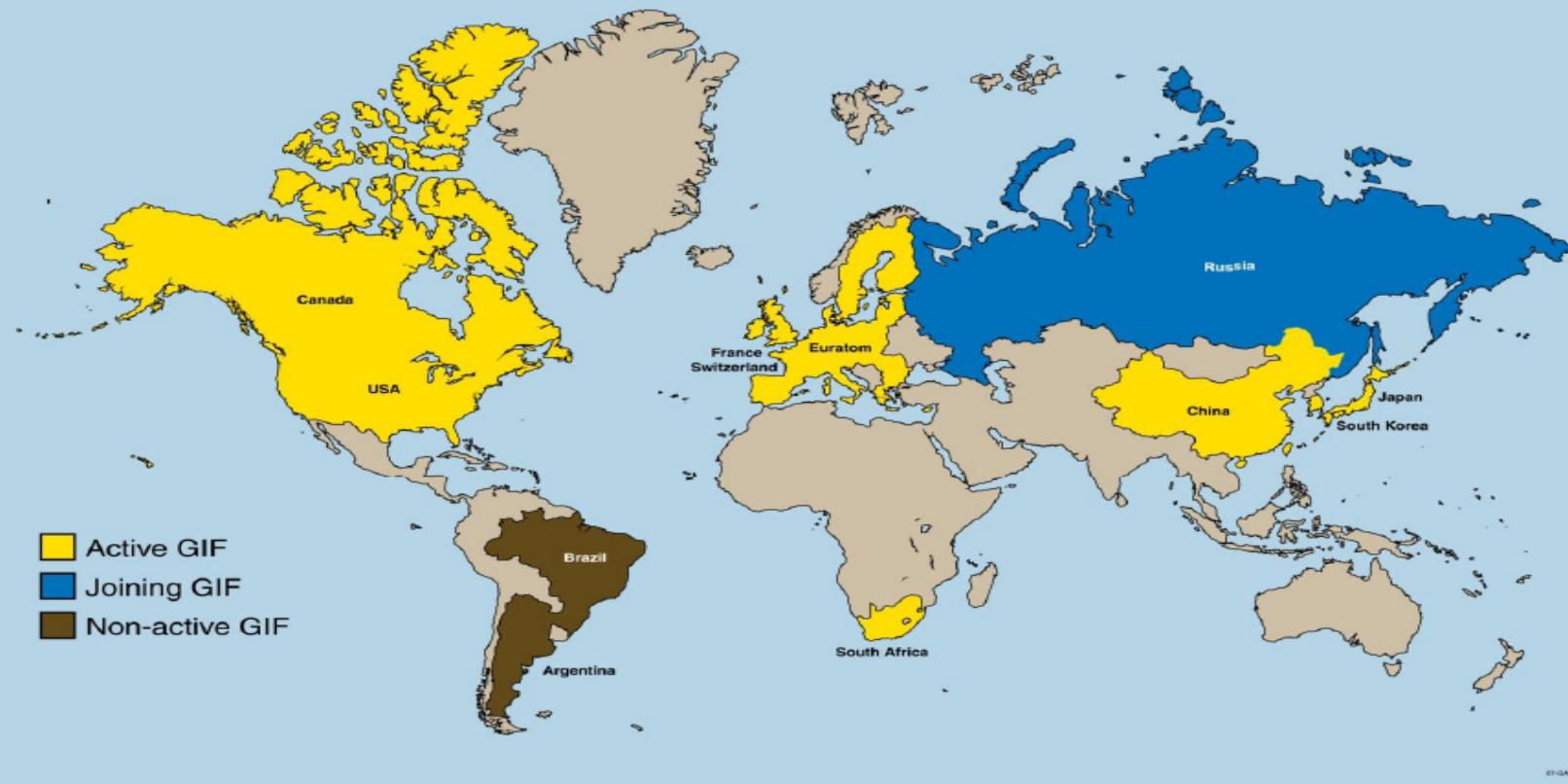
## Characteristics

- Fuel is liquid fluorides of U and Pu with Li, Be, Na and other fluorides
- 700–800°C outlet temperature
- 1000 MWe
- Low pressure (<0.5 MPa)

## Benefits

- Waste minimization
- Avoids fuel development
- Proliferation resistance through low fissile material inventory





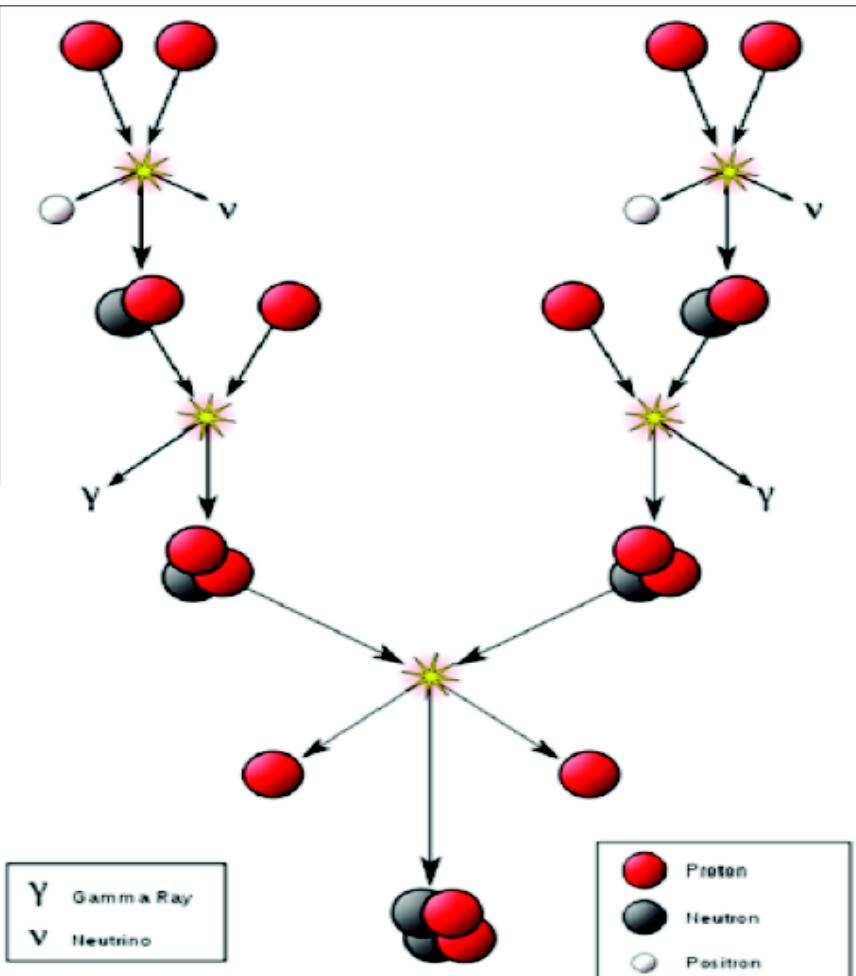
## Fusion : énergie thermonucléaire

Le principe repose sur la récupération de l'énergie dégagée lors de la fusion de noyaux légers. Cependant, à la différence de la fission qui peut aisément être induite par l'absorption d'un neutron thermique sur un noyau fissile, ici la fusion demande tout d'abord de vaincre la force électrique de répulsion qui s'exerce entre noyaux chargés positivement de manière à les amener à s'approcher suffisamment pour provoquer leur fusion.

La fusion de noyaux ne peut se produire que dans des plasmas. En effet, les atomes neutres interagissent d'abord par leurs cortèges électroniques, ce qui ne permet pas au noyaux de se rapprocher car ils sont beaucoup plus petits que les atomes.

Pour compenser en partie la répulsion électrique initiale, il faut disposer d'une énergie moyenne de l'ordre de 10-20 keV ce qui correspond à des températures supérieures à 100 M K.

Les conditions d'allumage et d'entretien de réactions thermonucléaires sont obtenues dans les couches profondes du plasma solaire. L'immense énergie rayonnée par le soleil est donc d'origine nucléaire !



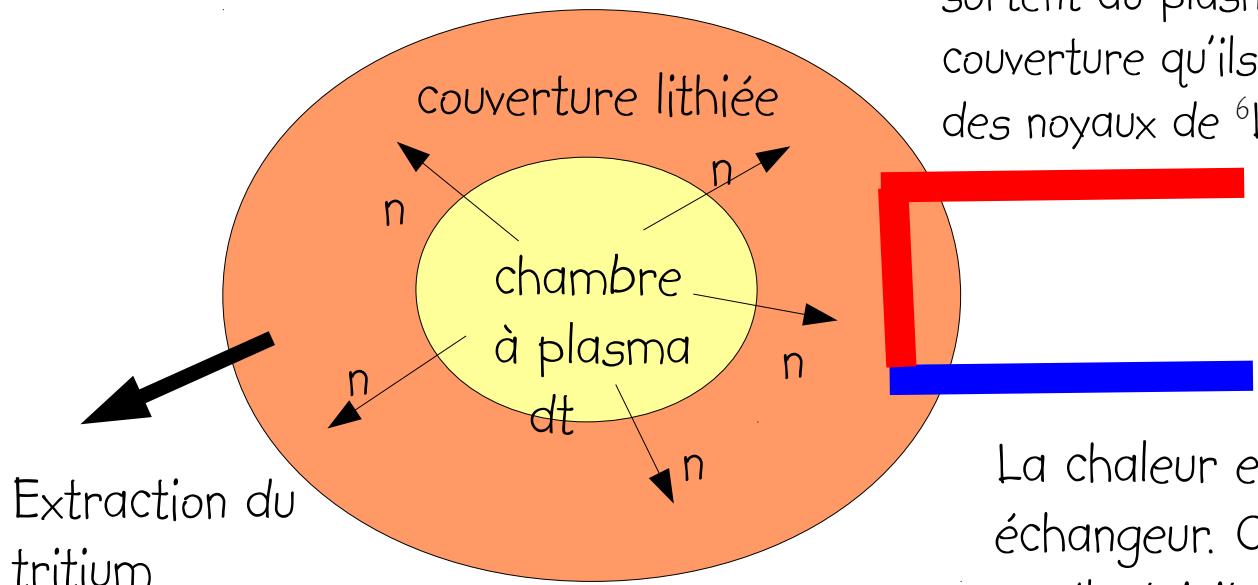
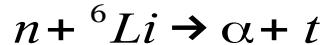
## Soleil

En son centre, à une température de 15 M K, le soleil convertit des protons (de l'hydrogène) en noyaux d'hélium selon la chaîne de réactions de fusion ci-contre.

Cependant, il n'est pas possible de reproduire de manière contrôlée les conditions d'un plasma solaire sur terre.

# La fusion contrôlée deutérium-tritium

La réaction de fusion envisagée dans la production contrôlée d'énergie thermonucléaire est la suivante :  $d + t \rightarrow \alpha (3,5 \text{ MeV}) + n (14 \text{ MeV})$



Les particules alpha chargées s'arrêtent dans le plasma et contribuent à maintenir son chauffage. Les neutrons sortent du plasma, déposent leur énergie dans la couverture qu'ils chauffent. Ils sont ensuite capturés sur des noyaux de  ${}^6\text{Li}$  pour régénérer le tritium.

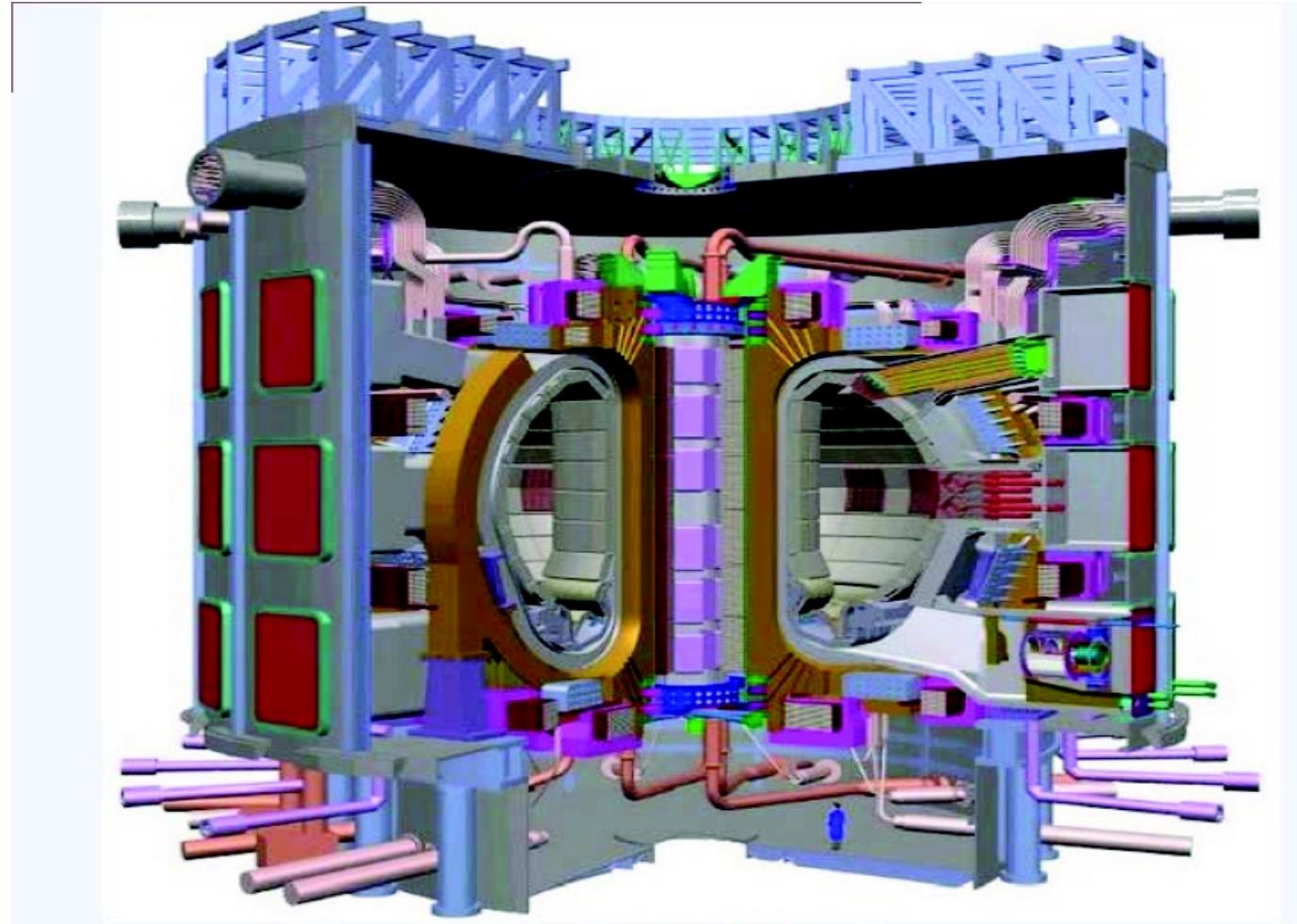
Extraction de la chaleur

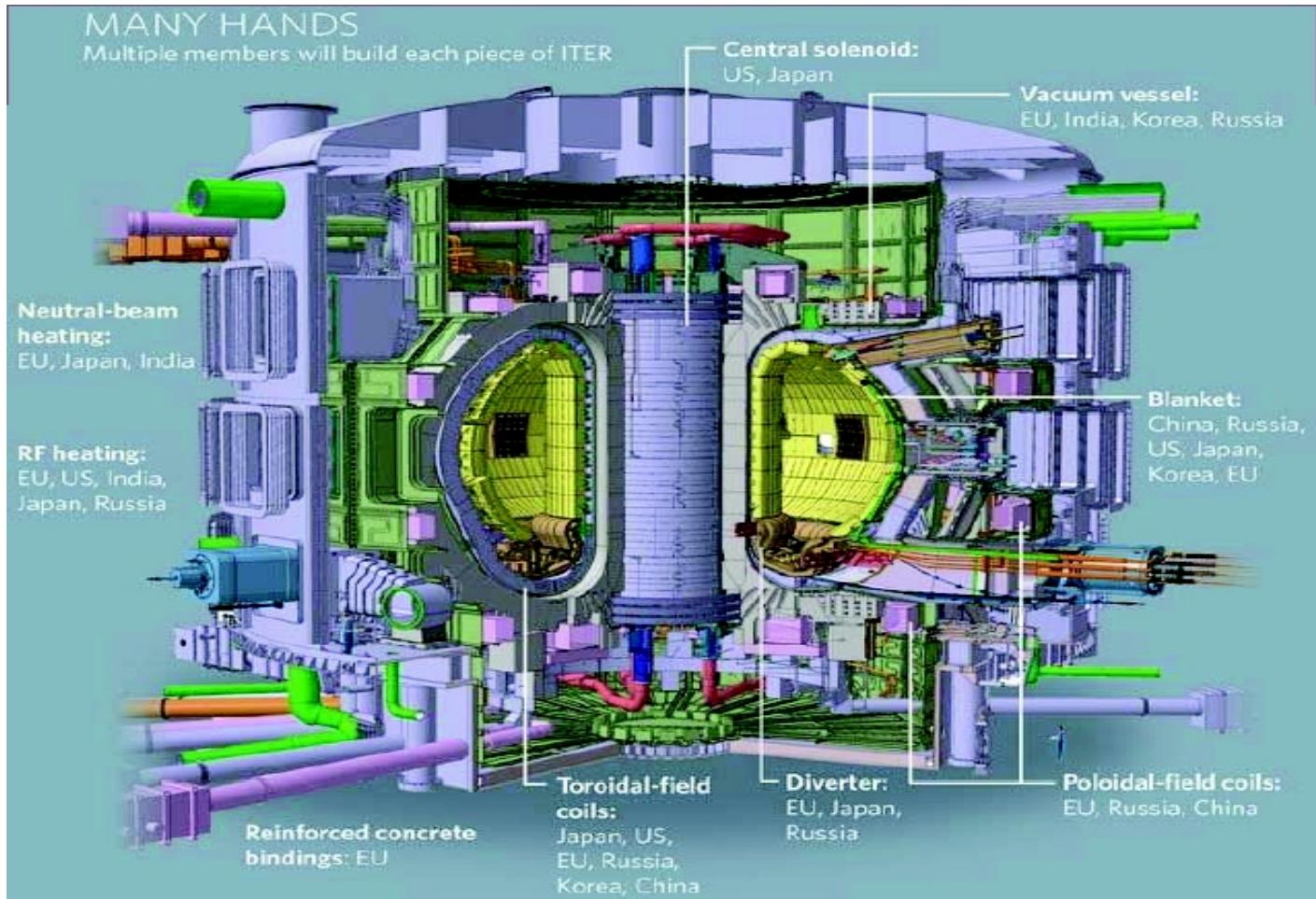
La chaleur est extraite de la couverture par un échangeur. Celle-ci peut ensuite être convertie en électricité dans une turbine.

# Les prototypes de réacteurs deutérium-tritium de type TOKAMAK

	TORE SUPRA (Cadarache)	JET (Culham, Angleterre)	ITER (Cadarache)
Puissance de fusion	-	16 MW	500 MW
Volume du plasma	30 m <sup>3</sup>	100 m <sup>3</sup>	840 m <sup>3</sup>
Grand rayon du plasma	2,40 m	3 m	6,20 m
Petit rayon du plasma	0,72 m	1,25 m	2 m
Hauteur du plasma	1,4 m	4,2 m	6,80 m
Durée de maintien des plasmas	6 minutes	≤1 minute	De 6 minutes à 16 minutes

ITER





# ITER en construction à Cadarache en 2019



