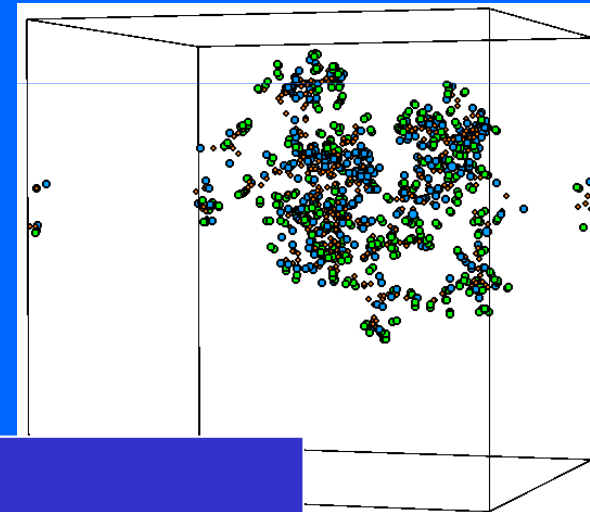
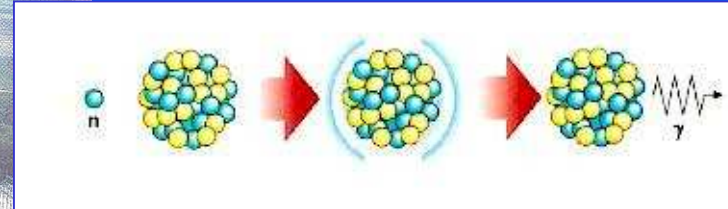
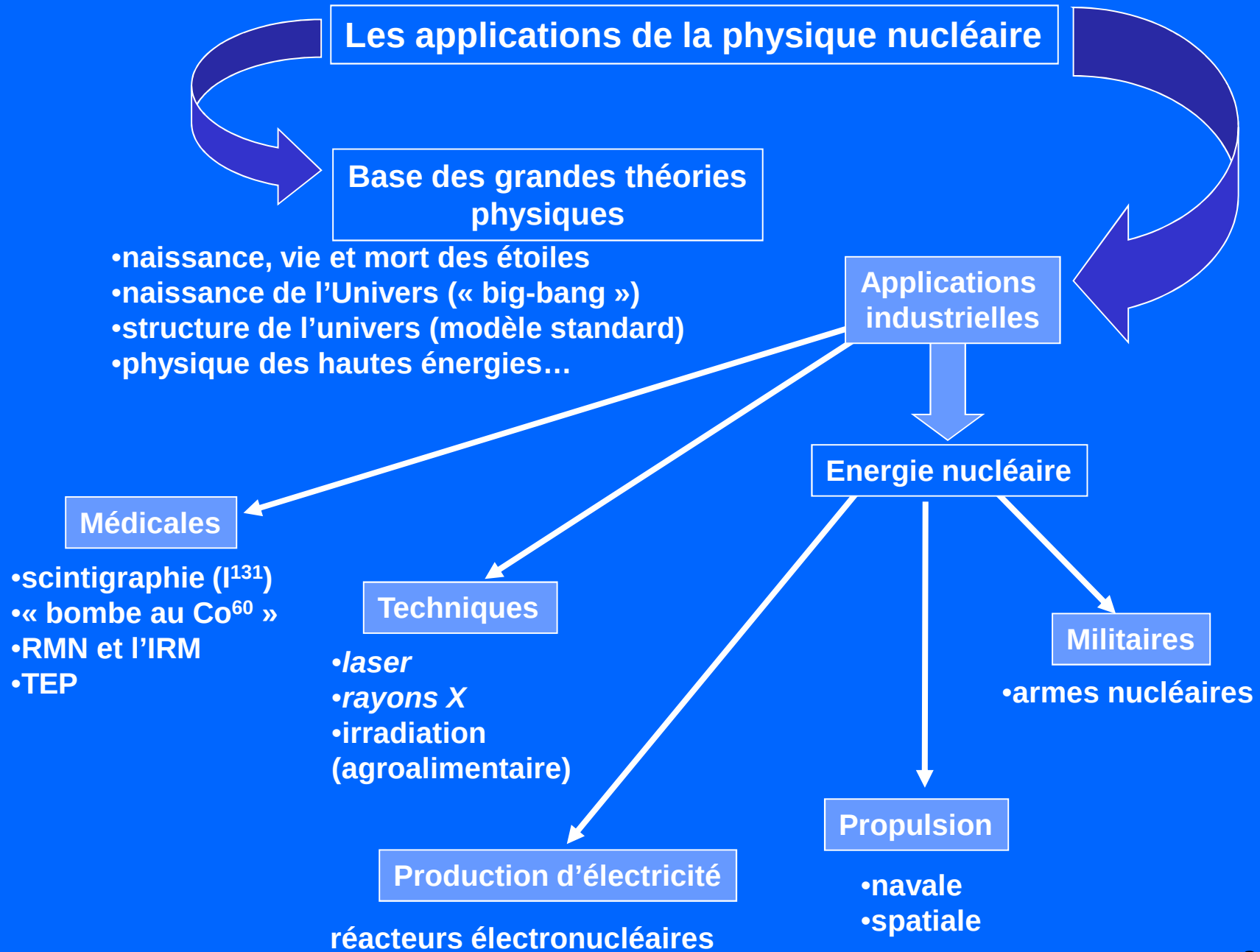


Université de Marne la Vallée

Physique atomique et nucléaire Applications Industrielles



J. Ruste
EDF Recherches et Développement
Département Matériaux et Mécanique des Composants
Les Renardières
77 Moret sur Loing



I – Les applications médicales :

- l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)**
- l'imagerie par Tomographie par Émission de Positons (TEP)**

II – La neutronique et la fission nucléaire

III – Applications de la fission : Les centrales électronucléaires

IV – L'avenir : les réacteurs nucléaires de la génération IV

V – La propulsion nucléaire

VI– La fusion thermonucléaire

VII – Les armes nucléaires

I – Les applications médicales

Ia - L'imagerie par résonance magnétique nucléaire (RMN et IRM)

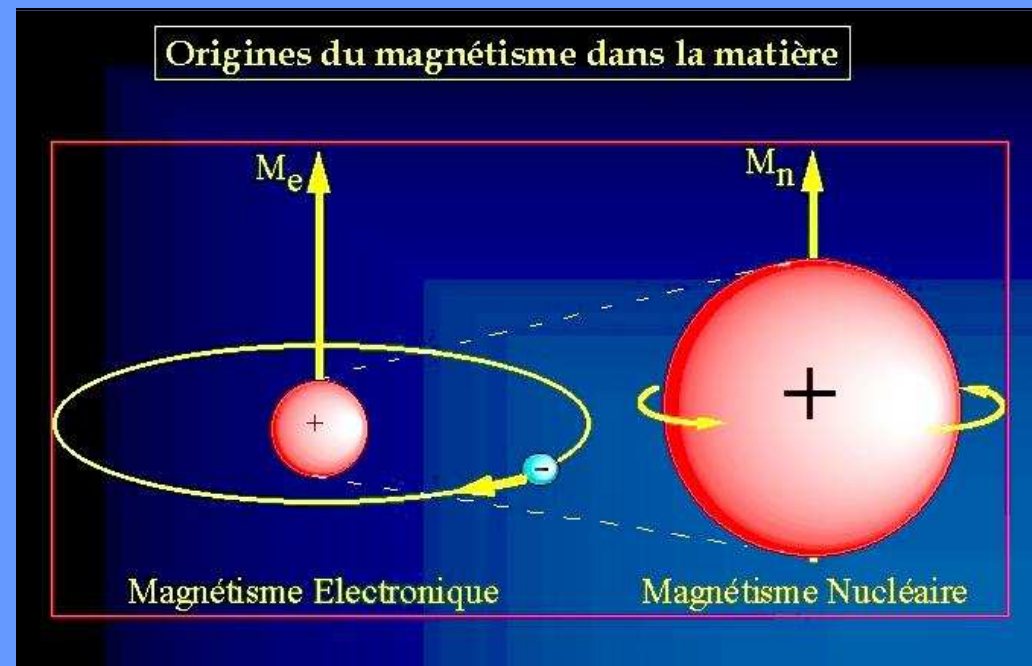
technique d'absorption résonante d'une onde radiofréquence par les noyaux atomiques exposés à un champ magnétique externe

applications :
- imagerie médicale (IRM Imagerie de résonance magnétique)
- analyse structurales moléculaires en chimie organique

La RMN : découverte par Isidor Rabi en 1938, Felix Bloch et Edward Purcell en 1948
L'IRM a été utilisée pour la 1ère fois en 1973 et appliquée à l'homme en 1979

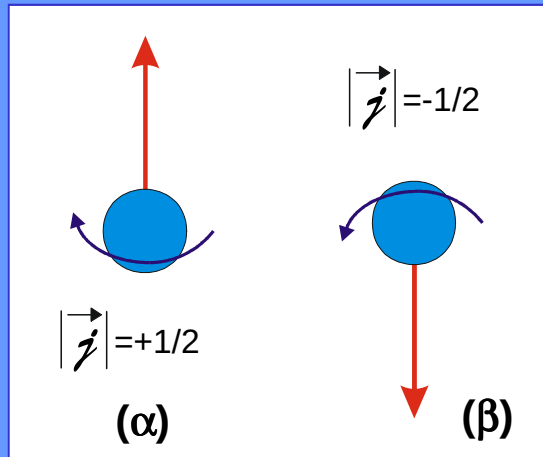
Principe

Les différents moments cinétiques électronique et nucléaire engendrent chacun un moment magnétique au niveau de l'atome



Le moment magnétique nucléaire :

associé au spin nucléaire



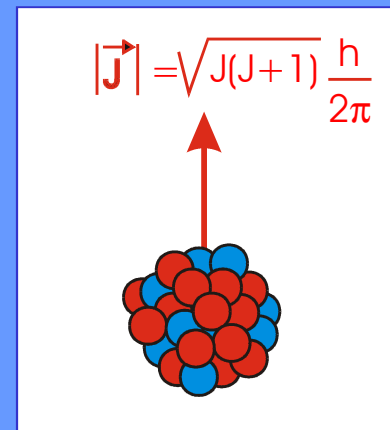
les nucléons possèdent un spin avec 2 orientations possibles : $\pm 1/2$

(notée traditionnellement α et β)

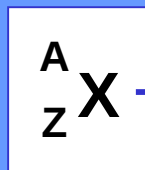
les protons et les neutrons se regroupent
par paires de spin opposé

Pour un noyau, le moment résultant dépend des nucléons
célibataires :

*les protons et les neutrons occupent
des « orbitales » nucléaires séparées*



$$J = \sum j_i$$



$$\begin{aligned} p &= Z \\ n &= A - Z \end{aligned}$$

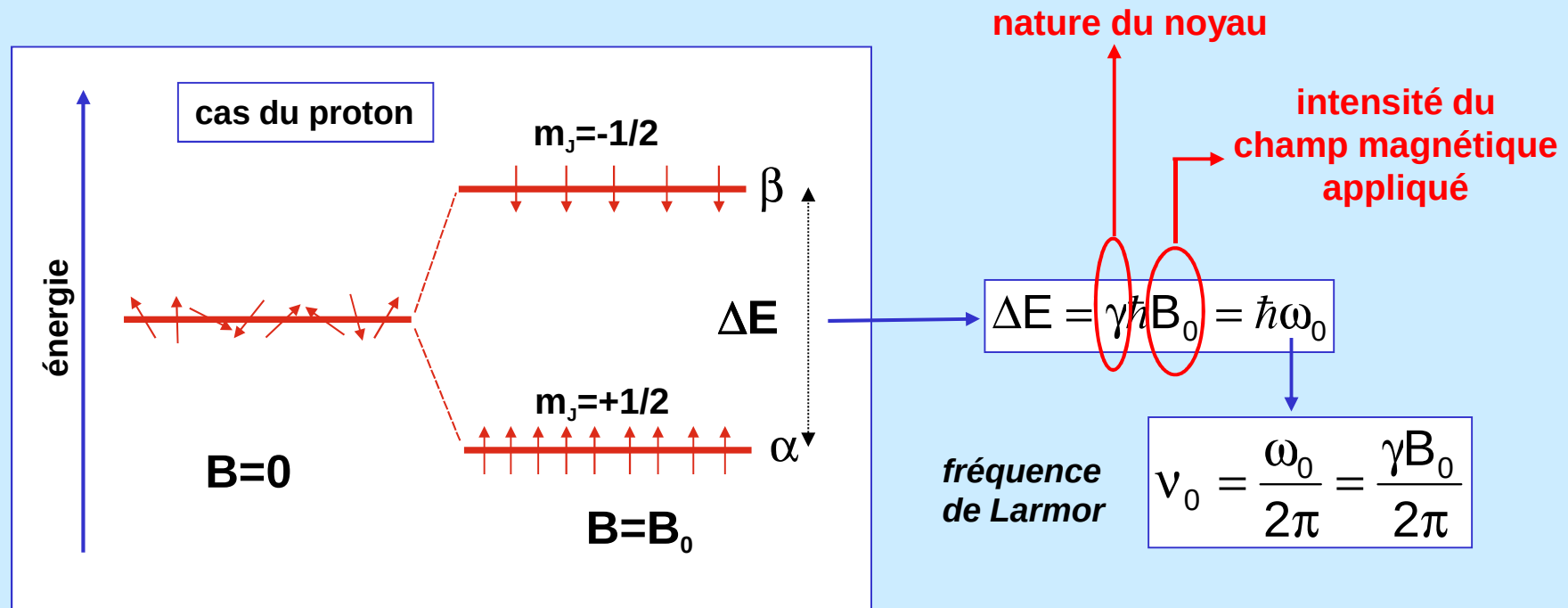
- si p paire et n paire $\rightarrow J=0$
- si p paire et n impaire $\rightarrow J=1/2$
- si p impaire et n paire $\rightarrow J=1/2$
- si p impaire et n impaire $\rightarrow J=1$

*Comme pour les électrons, on peut trouver des nucléons célibataires sur plusieurs
niveaux d'énergie et J peut être supérieur à 1*

moment cinétique $\vec{J} \longrightarrow$ moment magnétique $\vec{\mu}$

Les moments cinétiques sont quantifiés

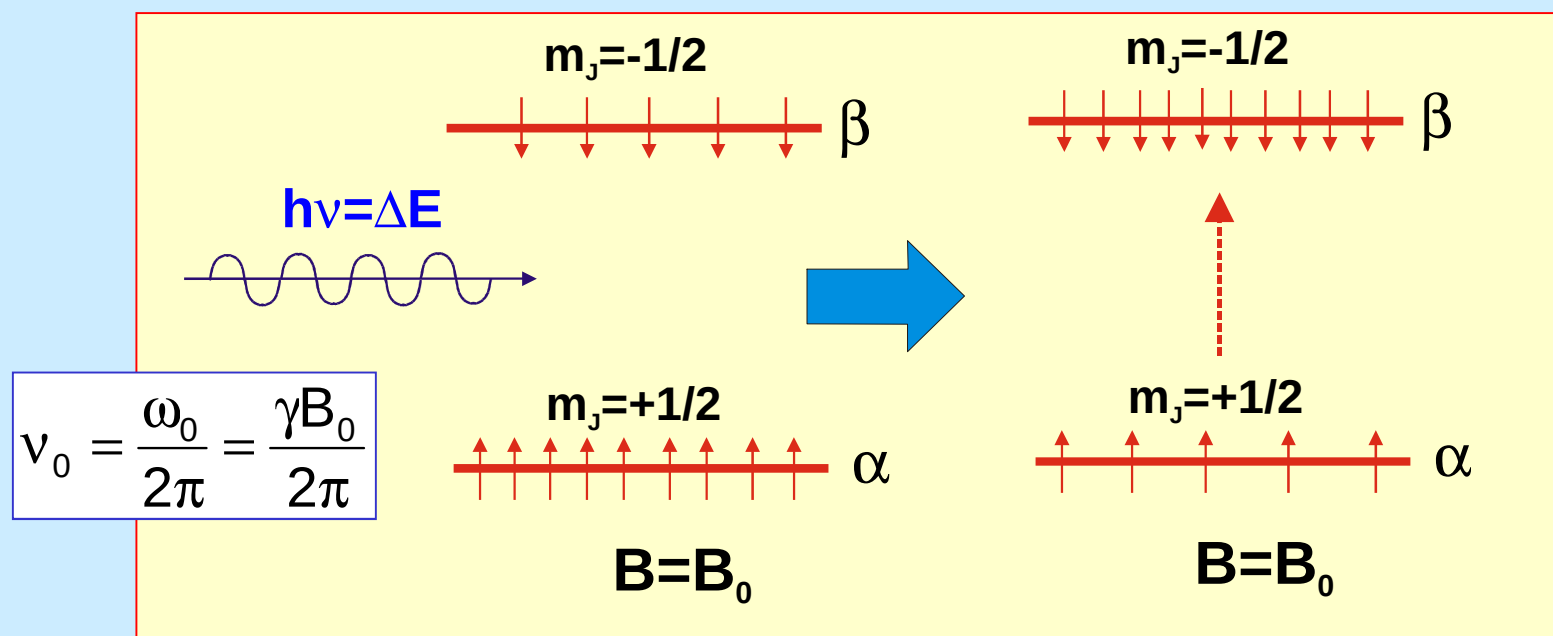
- 1) En l'absence de champ magnétique externe, les spins α et β sont en nombre identique et les moments magnétiques internes sont orientés de manière quelconque
- 2) si on applique un champ magnétique extérieur :
 - il y a levée de dégénérescence des différents niveaux énergétiques liés au moment magnétique nucléaire
 - les moments nucléaires s'alignent sur la champ magnétique externe, soit parallèlement pour α , en opposition pour β



La différence d'énergie ΔE est proportionnelle au champ magnétique appliqué⁶

Application d'un champ électrique radiofréquence

Si on applique une onde électromagnétique de fréquence égale à la fréquence de Larmor, il y a résonance c'est à dire absorption avec déplacement du niveau α vers le niveau β : transfert de population

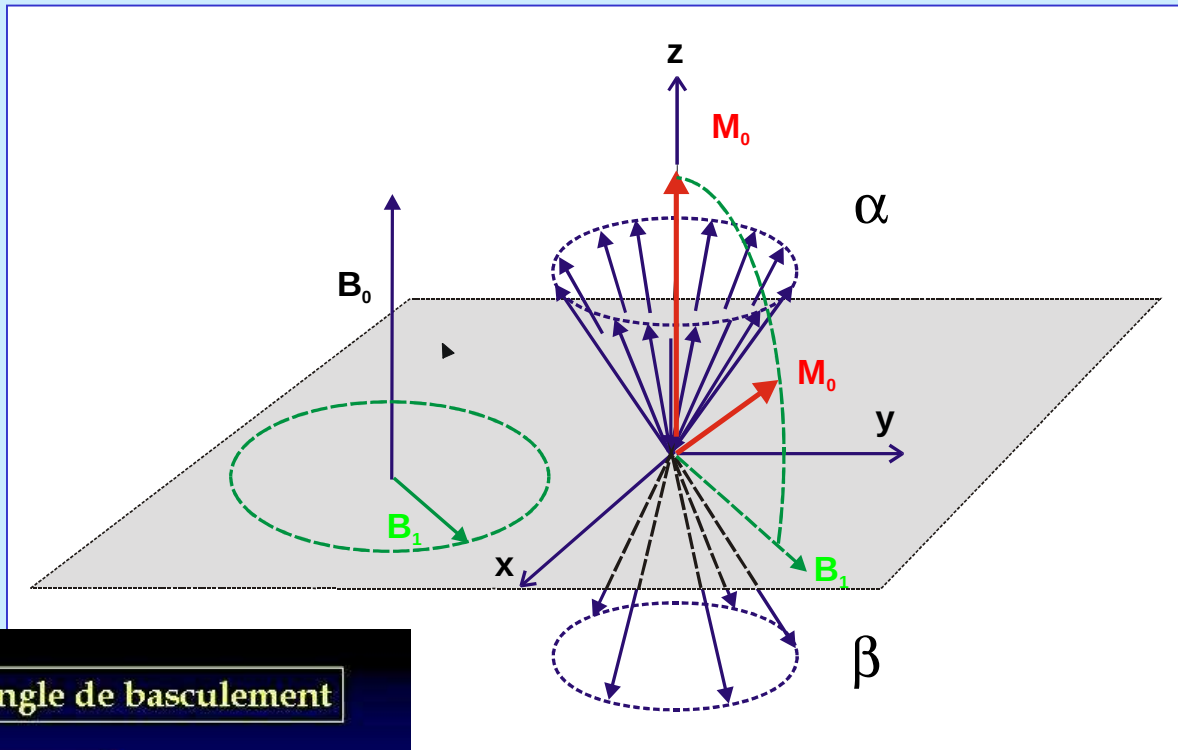


La fréquence de résonance dépend de la nature du noyau :

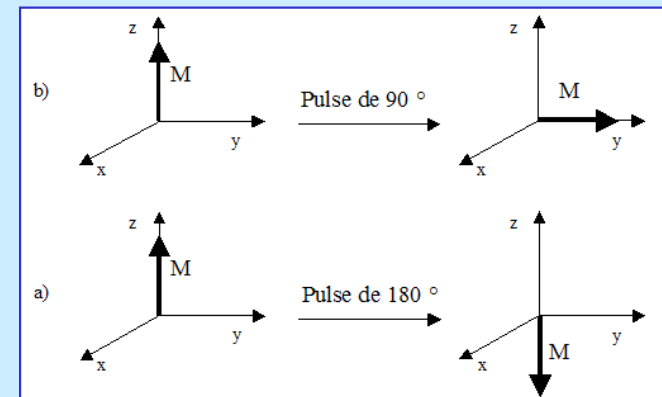
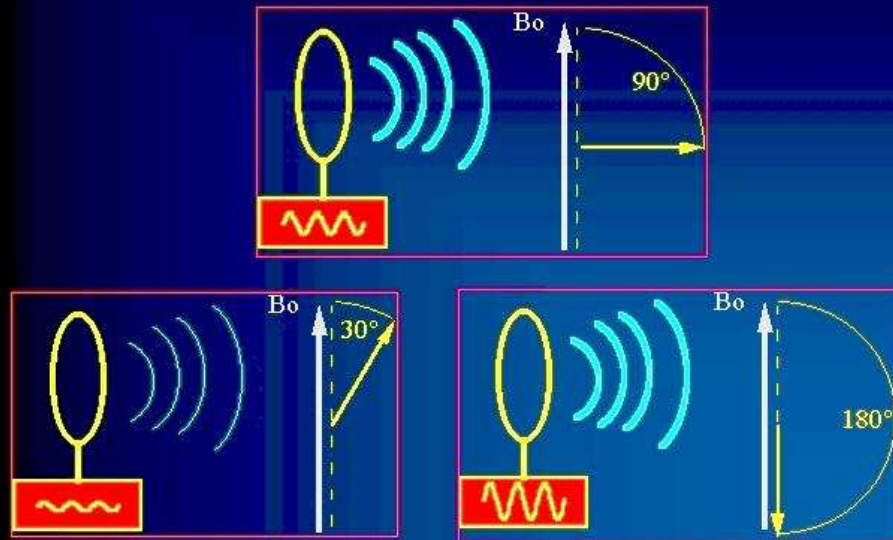
	$B_0 = 9,4 \text{ T}$	$B_0 = 1,4 \text{ T}$
^1H	400 MHz	60 MHz
^{19}F	376 MHz	56 MHz
^{31}P	162 MHz	24 MHz
^{13}C	100,6 MHz	15 MHz
^{23}Na	105,8 MHz	16 MHz

L'action du champ induit par le rayonnement de radiofréquence fait pivoter le moment magnétique d'un angle α (« flip angle ») qui dépend de l'intensité du rayonnement radiofréquence

généralement on fait pivoter de 90° (impulsion $\pi/2$) ou de 180° (impulsion π).



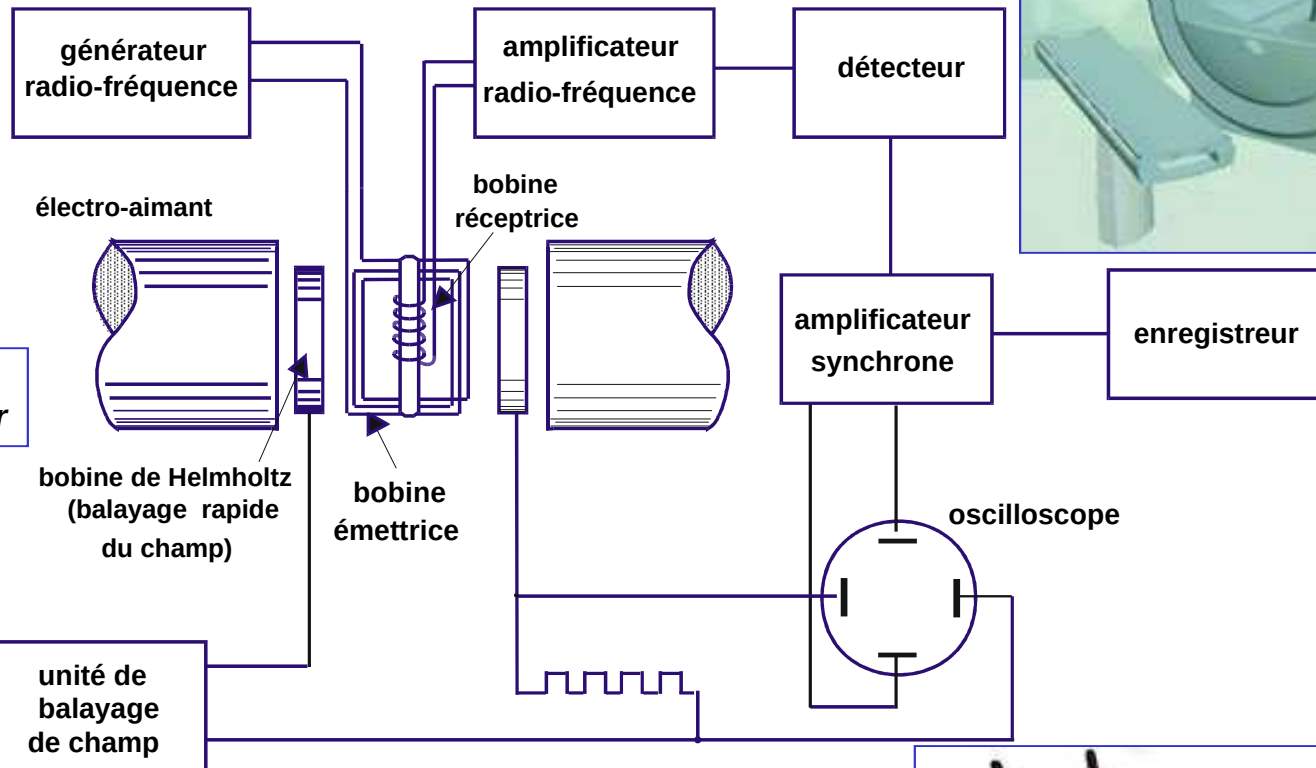
Impulsions de radiofréquence et angle de basculement



Le moment magnétique est en précession autour de l'axe M_0 incliné de l'angle α

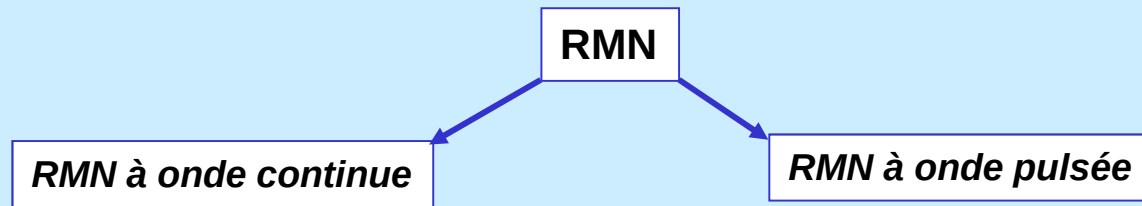
Spectrométrie par résonance magnétique nucléaire

**électro-aimant
supra-conducteur**



***Le champ radiofréquence est perpendiculaire
au champ magnétique***





- étude des propriétés magnétique du noyau
- analyses en chimie moléculaire

Imagerie de résonance magnétique (IRM)

1) RMN à onde continue

2 techniques :

- on maintient le champ magnétique constant et on fait varier la fréquence
- on maintient la fréquence constante et on fait varier le champ magnétique

Généralement on préfère la seconde solution pour des facilités techniques

Dans les 2 cas on recherche des conditions d'absorption résonnante (signalée par une forte absorption d'énergie)

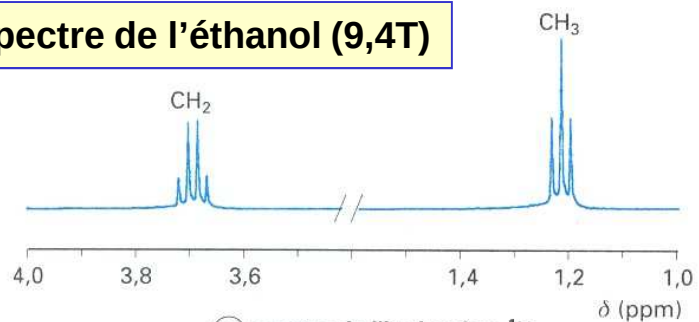
La fréquence de Larmor :

$$\nu_0 = \gamma \frac{B_0}{2\pi} (1 - \sigma)$$

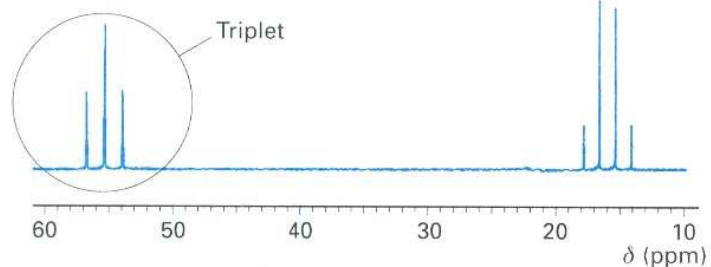
*nature du noyau
(élément chimique)*

*effet d'écran lié à la
liaison chimique
(effet d'environnement)*

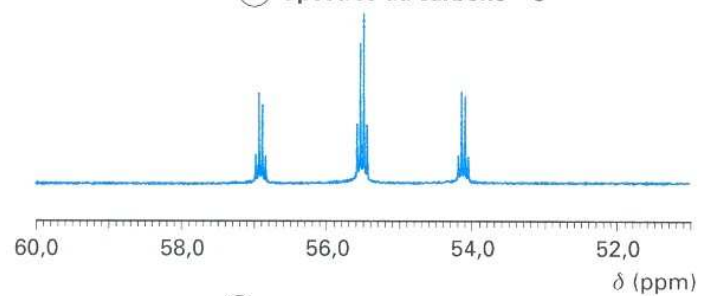
Spectre de l'éthanol (9,4T)



(a) spectre de l'hydrogène ^1H



(b) Spectres du carbone ^{13}C

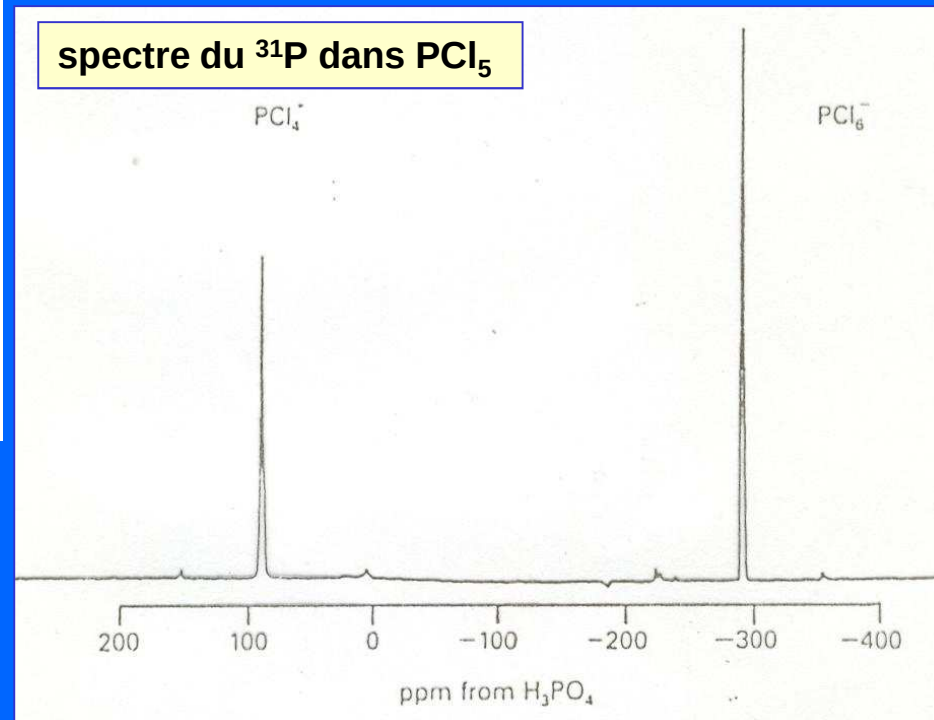


(c) vue agrandie du triplet de b

Spectres RMN des molécules

Informations sur les liaisons chimiques

spectre du ^{31}P dans PCl_5

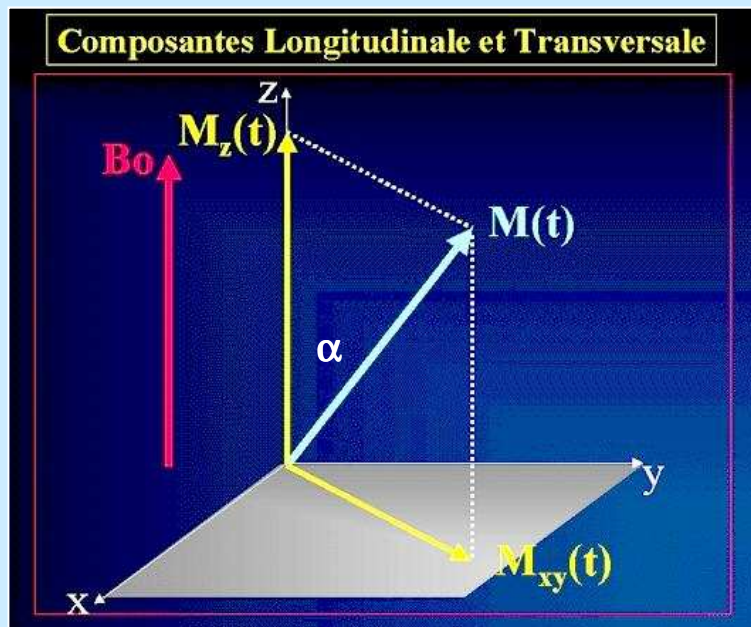


2) RMN à onde pulsée

Si on coupe le rayonnement radiofréquence, le moment magnétique va s'aligner de nouveau sur le champ magnétique externe avec émission d'une onde électromagnétique

Ce basculement ne sera pas instantané :

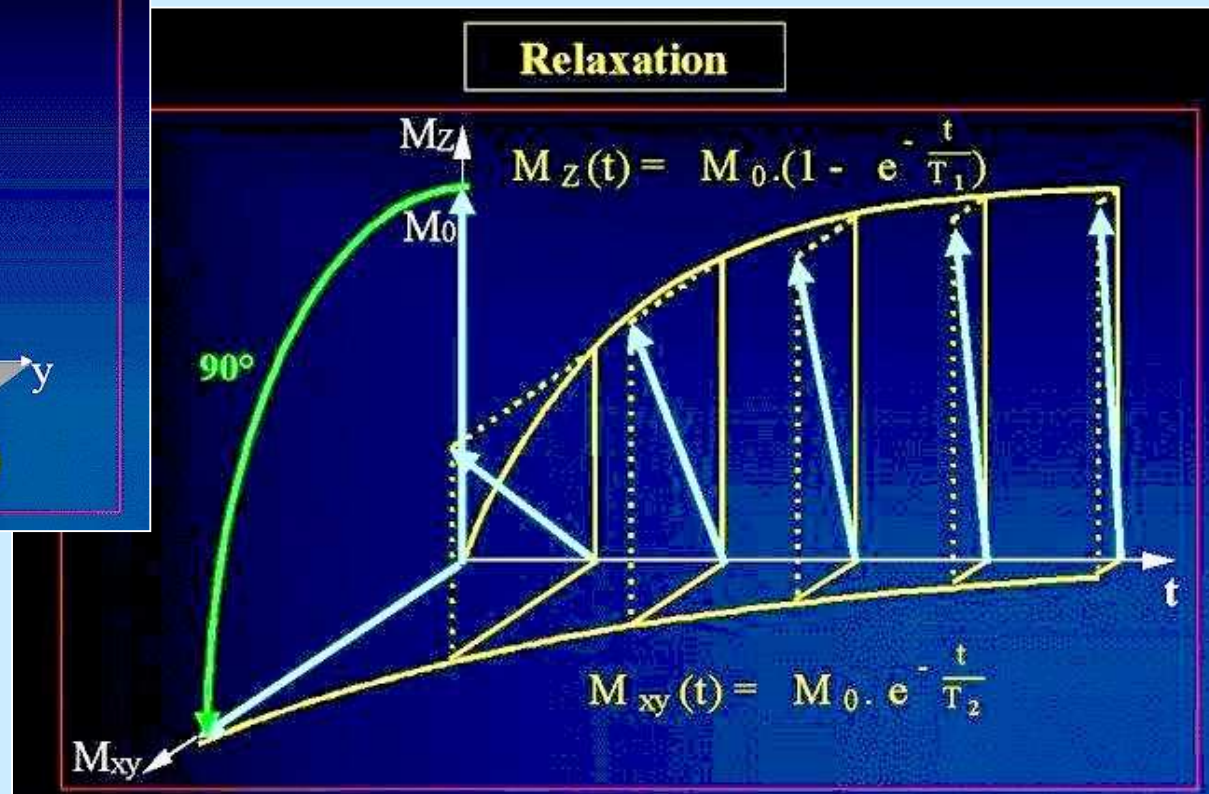
on peut définir deux temps caractéristiques, T_2 liés au déplacement de la composante transversale M_{xy} et T_1 à celui de la composante longitudinale M_z du moment magnétique...



Les lois de retour à l'équilibre
sont des lois exponentielles

généralement : $T_1 > T_2$

T_1, T_2 : temps de relaxation



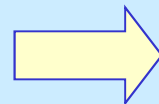
Ordres de Grandeurs des Temps de Relaxation à 1,5 T

Temps de Relaxation Tissus Humains	T1	T2
Liquide Céphalo-rachidien	2500 ms	2000 ms
Substance Grise	900 ms	90 ms
Substance Blanche	750 ms	80 ms
Graisse	300 ms	40 ms

Selon le milieu analysé, les temps de relaxation varient fortement

Par une transformée de Fourier, on peut séparer les contributions des différents milieux

Pour obtenir une information 3D on utilise des gradients linéaires de champ magnétique dans les 3 directions de l'espace, qui se superposent au champ B_0 , et permettent de séparer chaque point de l'espace (voxel) de façon univoque



l'imagerie par résonance magnétique (IRM)

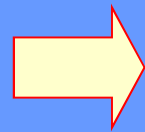
Les images IRM ont une moins bonne résolution que le scanner mais :

- offre un meilleur contraste
- pas d'effets néfastes pour l'organisme

fréquence de Larmor :

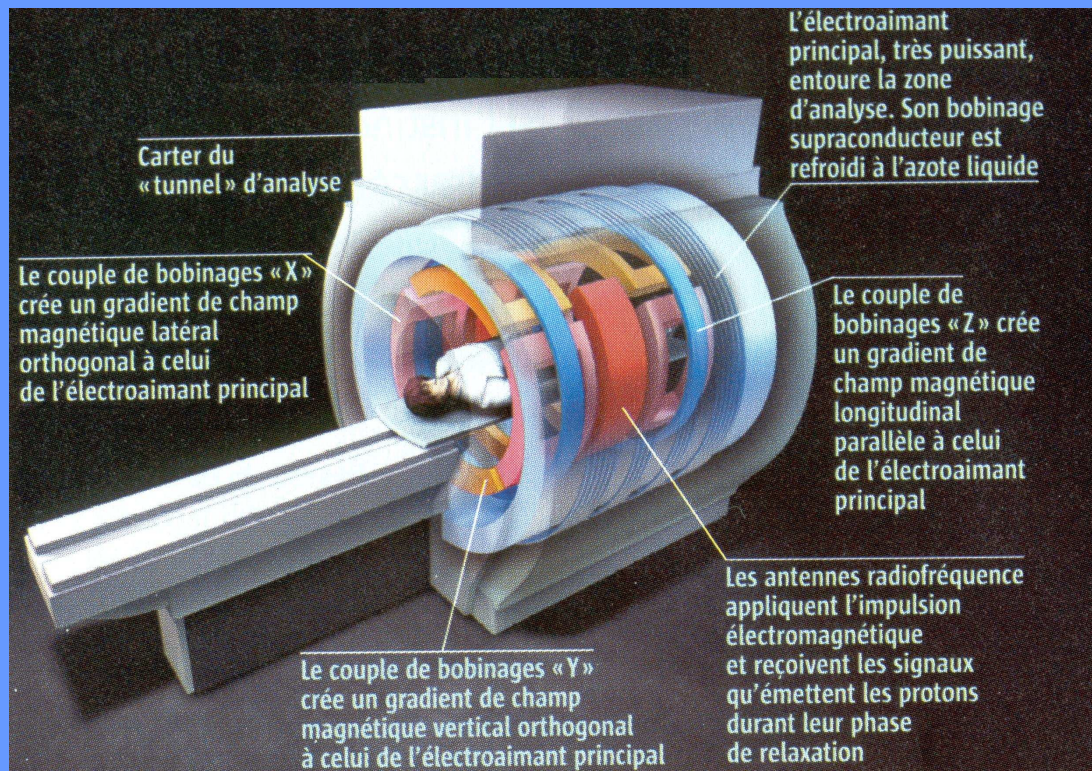
$$\nu_0 = \gamma \frac{B_0}{2\pi}$$

En faisant varier le champ magnétique on fait varier la fréquence de Larmor



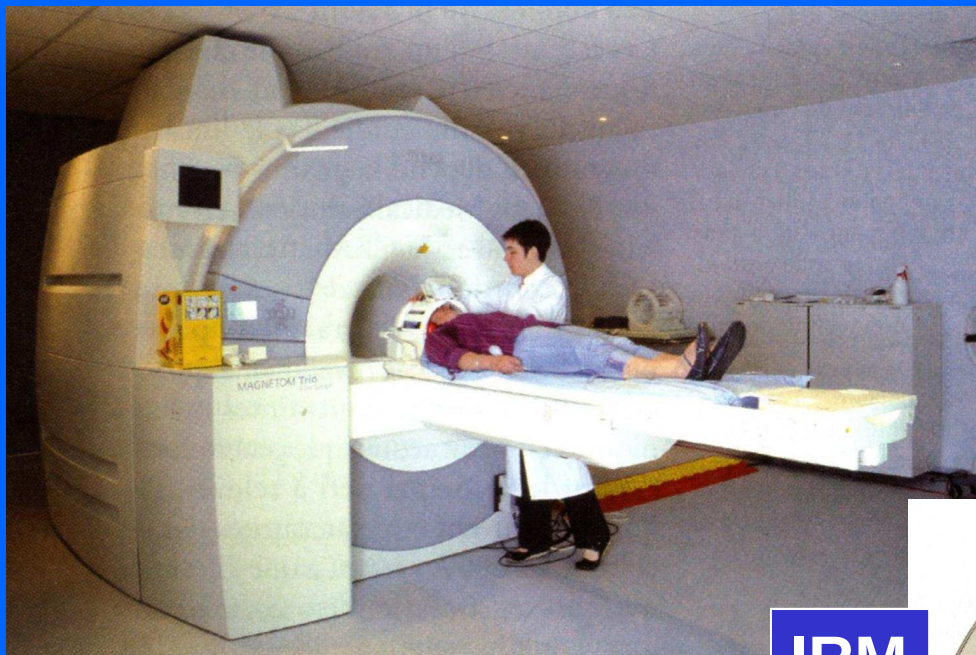
méthode des gradients de champ

On ajoute des électroaimants supplémentaires (3 couples) permettant de créer dans les 3 directions des champs magnétiques croissants



En se combinant au champ principal, on divise l'espace en voxels possédant une fréquence de Larmor propre...

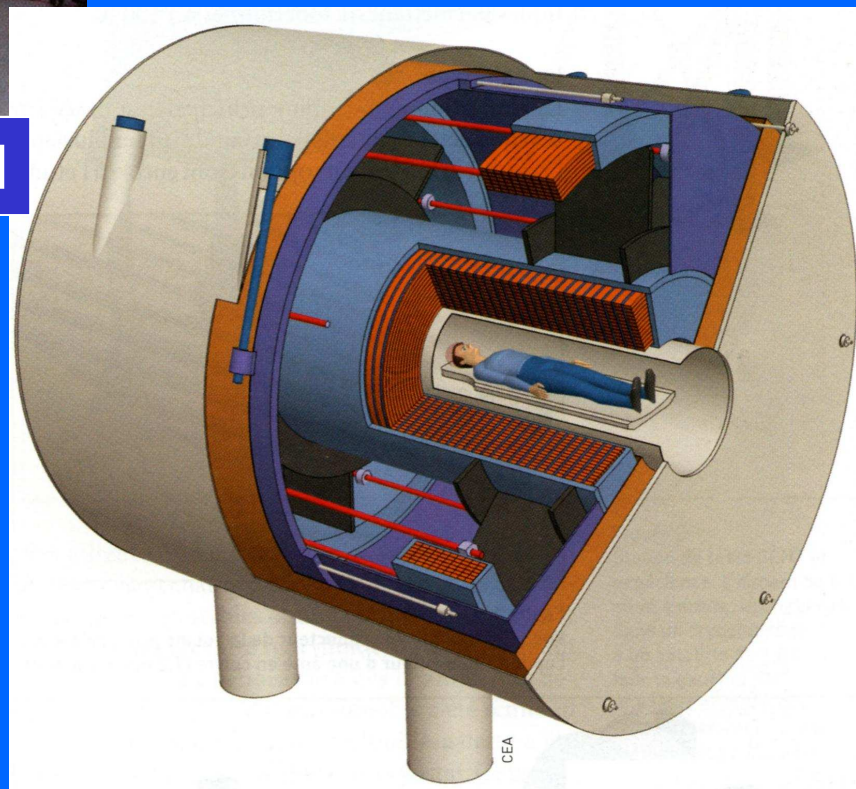
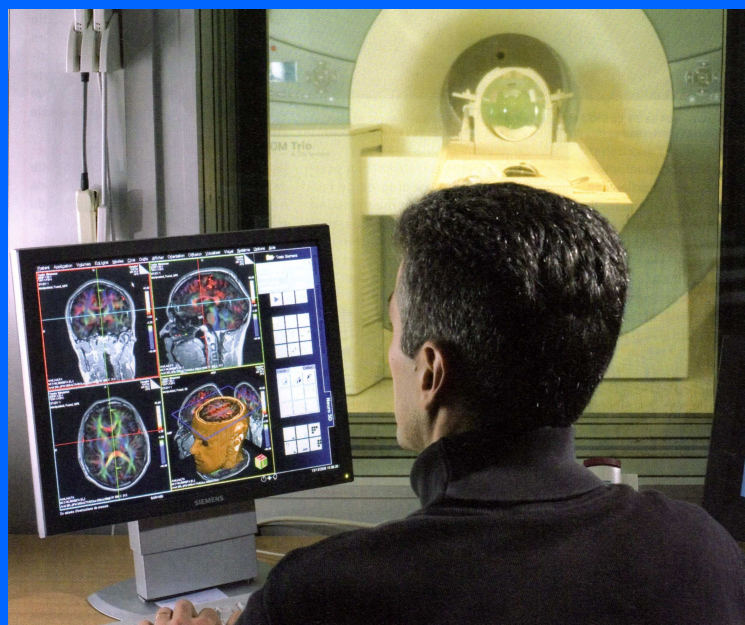
On mesure la totalité des fréquences émises que l'on sépare et trie par une analyse de Fourier, permettant d'observer une région particulière de l'organe analysé...



IRM de 3 Teslas (NeuroSpin, CEA Saclay)

Projet d'IRM à aimant de 11,7 Teslas

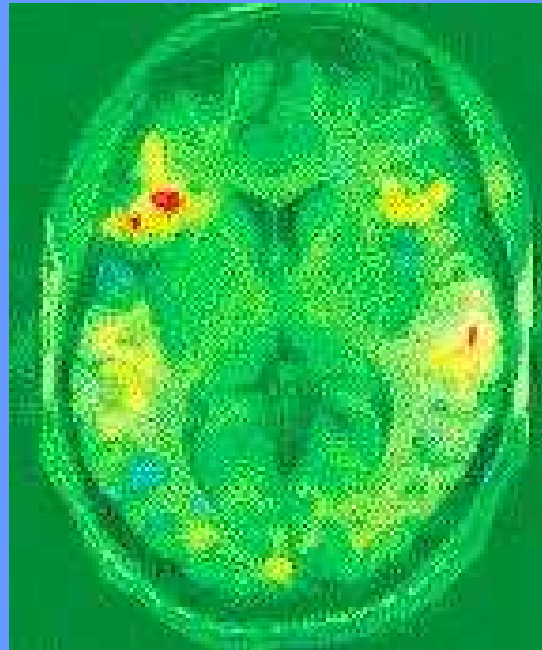
IRM



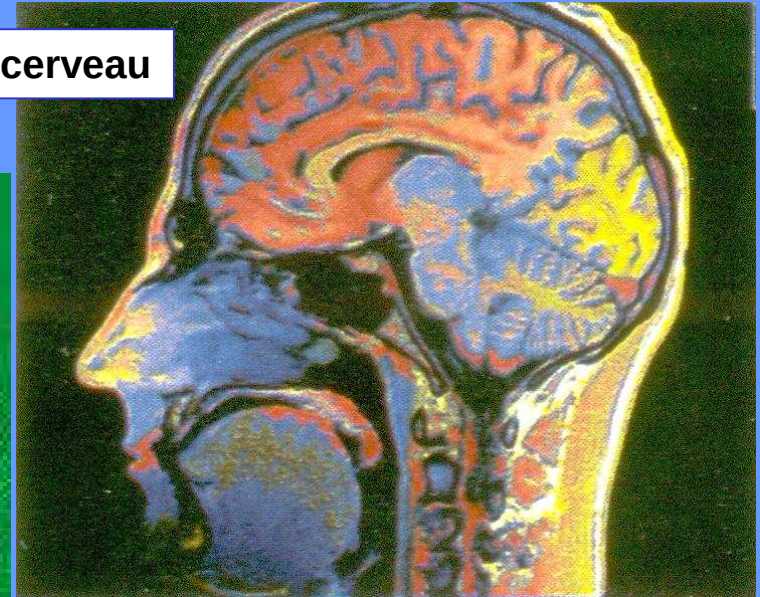
11,7 T = 230 000 fois le champ magnétique terrestre



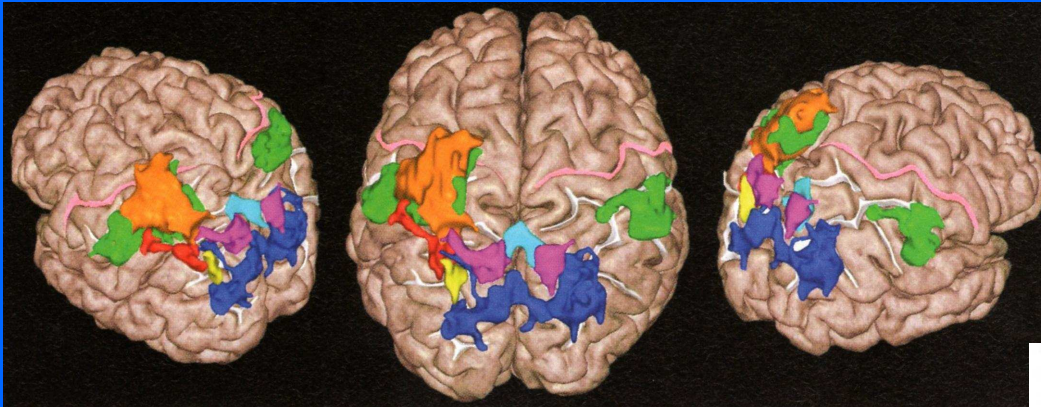
moelle épinière



coupes du cerveau

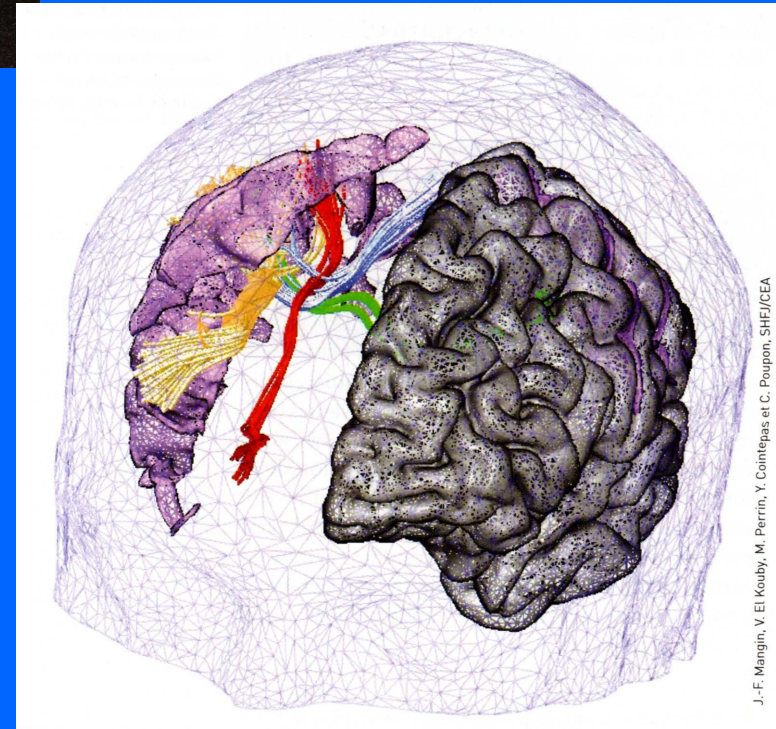


circuits sanguins
rénaux

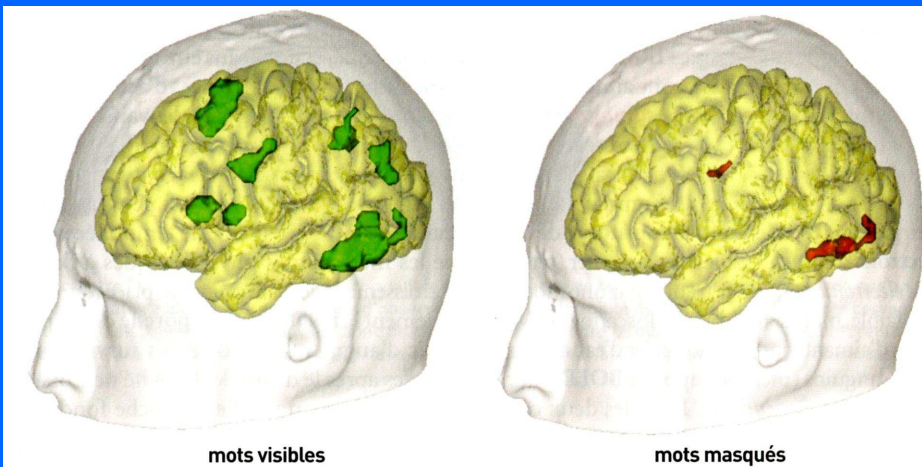


IRM fonctionnelle : observations des zones actives du cerveau activées en fonction de la tâche effectuée

IRM de diffusion : cartographie des « autoroutes de l'information », c'est à dire des faisceaux de fibres permettant aux neurones de communiquer



J.-F. Mangin, V. El Kouby, M. Perrin, Y. Coitepas et C. Poupon, SHF/CEA

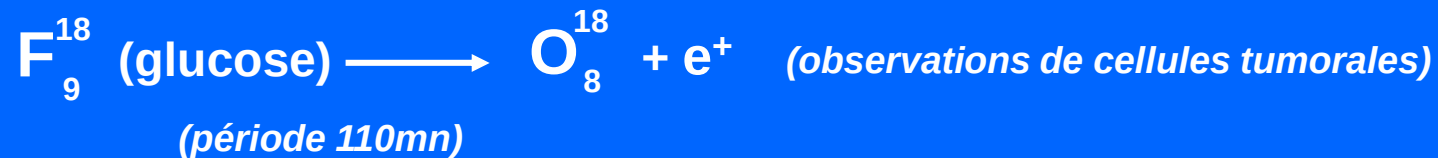
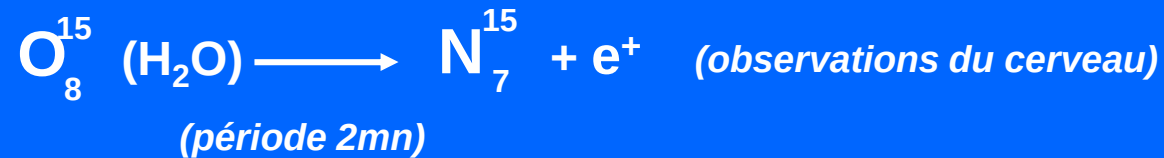


mots visibles

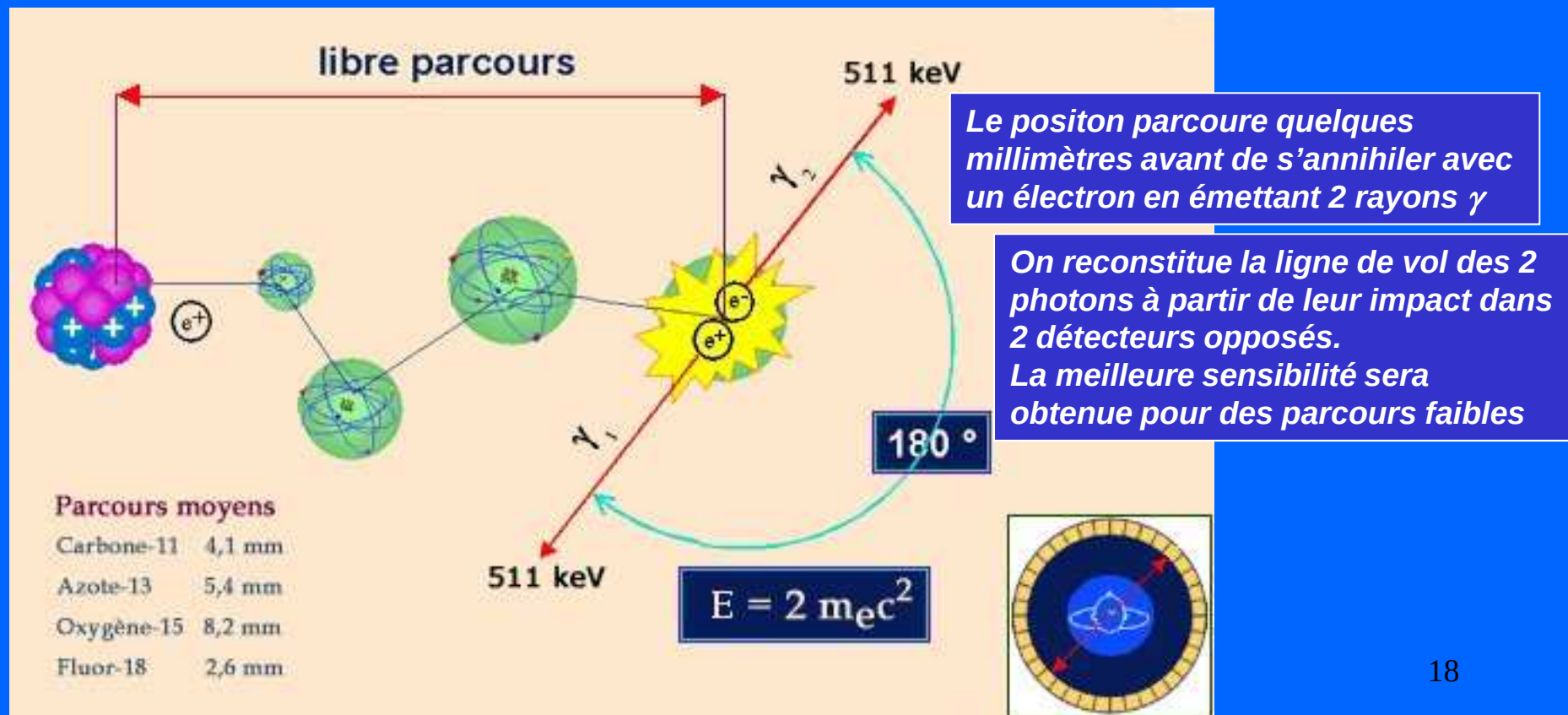
mots masqués

Observation de la « perception subliminale » des mots : un sous ensemble des régions activées par la lecture consciente l'est aussi lors de la perception subliminale des mots.

Ib - La tomographie par émission de positons (TEP)



(18F- fluoro-dexosy-glucose – 180 à 300 MBq, soit 3,4 à 5,7 mSv)

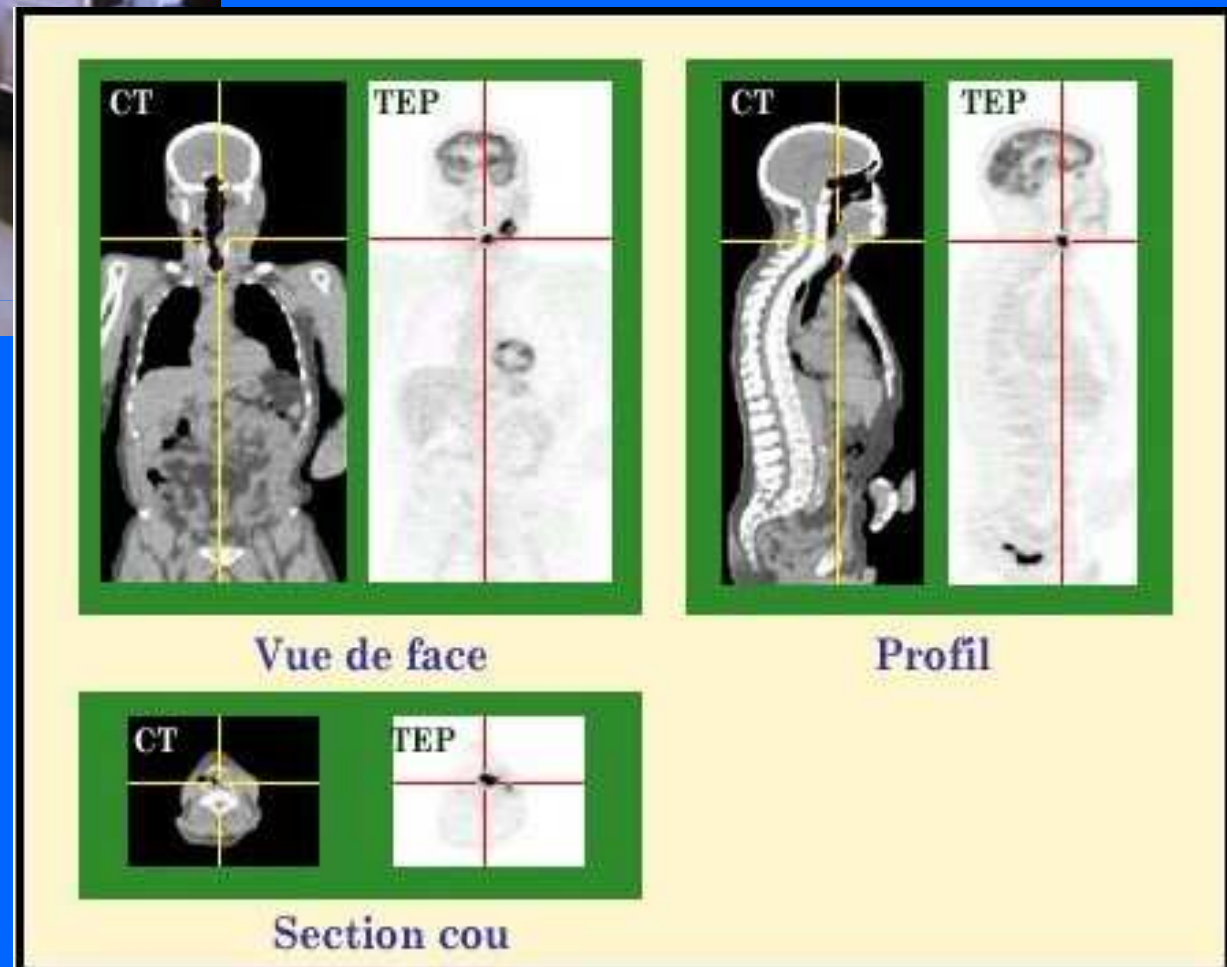


On peut faire ensuite une reconstruction 3D à partir de coupes de quelques millimètres d'épaisseur et en déduire le débit sanguin, l'activité chimique, etc.

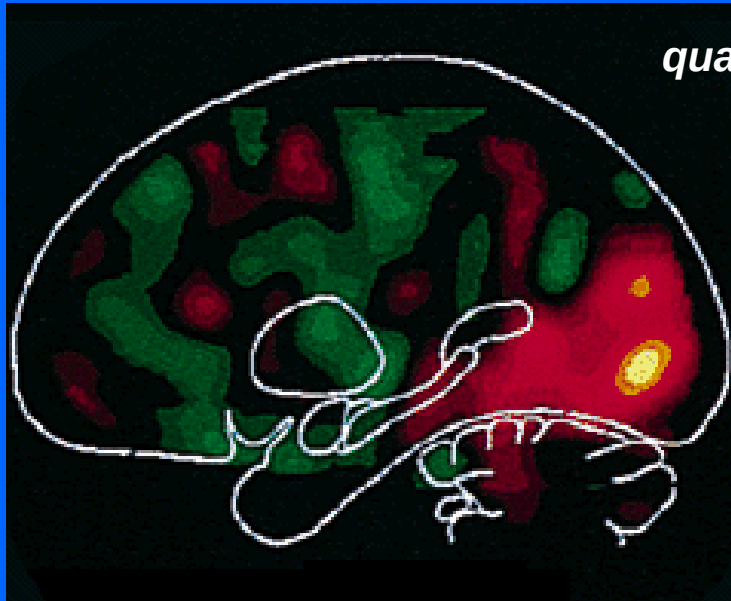


Observation du cerveau

Contrairement au scanner qui donne une image précise mais purement anatomique, le TEP montre les zones anormalement actives, caractéristiques d'une tumeur (ici du larynx)

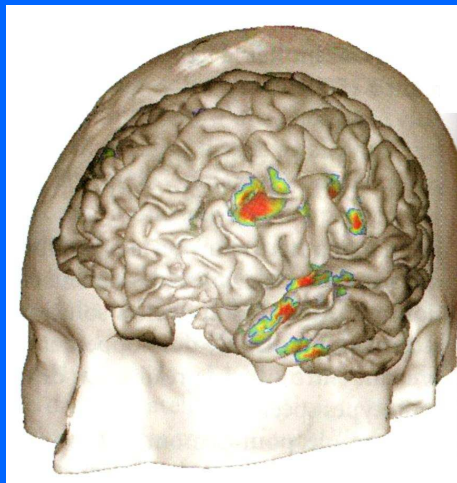
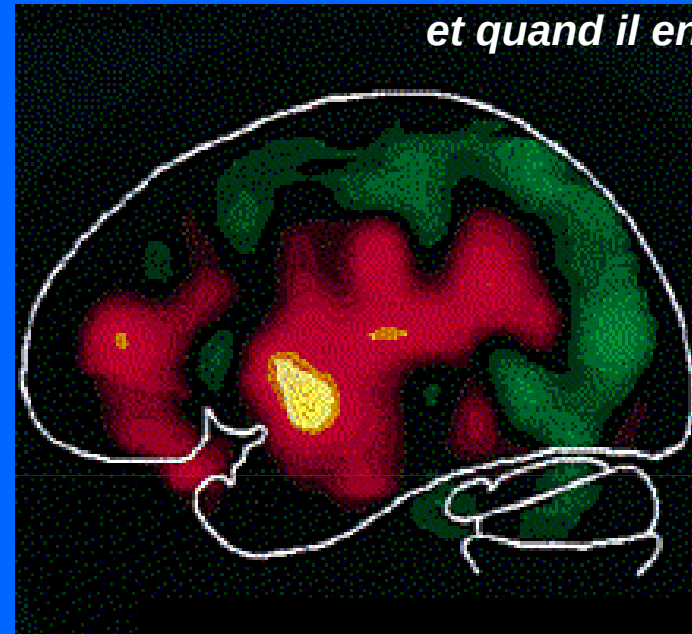


quand le cerveau lit...



Images TEP d'activités cérébrales

et quand il entend...



Couplage TEP-IRM

dépression
mélancolique

*fusion de l'image IRM avec l'image TEP montrant
l'activité énergétique du cerveau*

La spectrométrie par annihilation de positons est également utilisée en matériaux pour détecter et caractériser les microcavités, invisibles par les techniques habituelles (TEM)

*La dure de vie d'un positon passe de 120 ps à près de 500 ps
dans une microcavité de 50 lacunes*

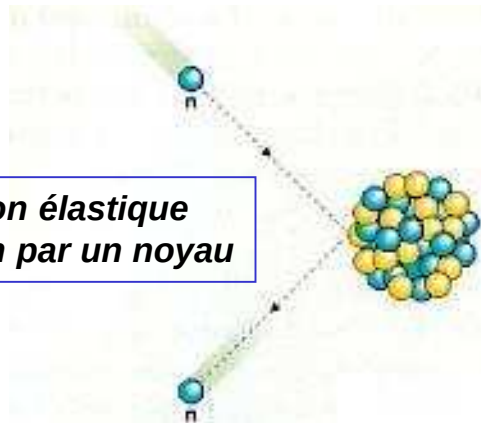
II – La neutronique et la fission nucléaire

Interactions d'un neutron avec la matière

Énergie des neutrons : entre 25 meV (neutron thermique) et 10 MeV (neutrons rapides)

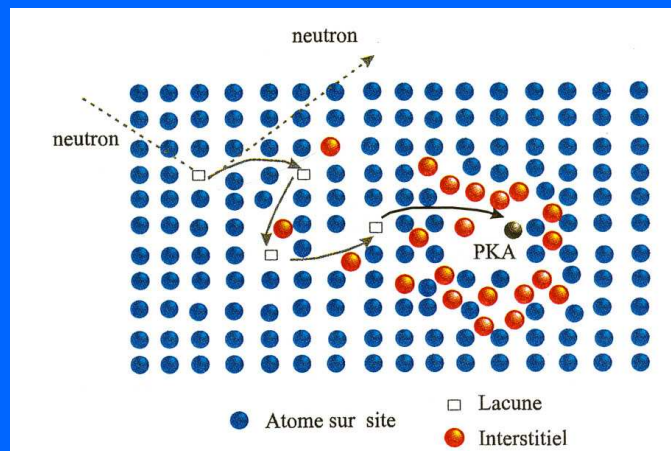
Quelles sont des différentes interactions d'un neutron et d'un noyau ?

1 - Diffusion élastique d'un neutron par un noyau



- diffusion élastique
- absorption

- transfert d'énergie vers l'atome heurté
- éjection de cet atome hors de son site
- chocs multiples avec les autres atomes
- « cascade de déplacements atomiques »
- création de défauts ponctuels (lacunes et interstitiels)
- évolution vers de plus gros défauts
- diminution des caractéristiques mécaniques



vieillissement sous irradiation
des matériaux



2 -Absorption d'un neutron par un noyau
transmutation, radioactivité (α , β ou γ)

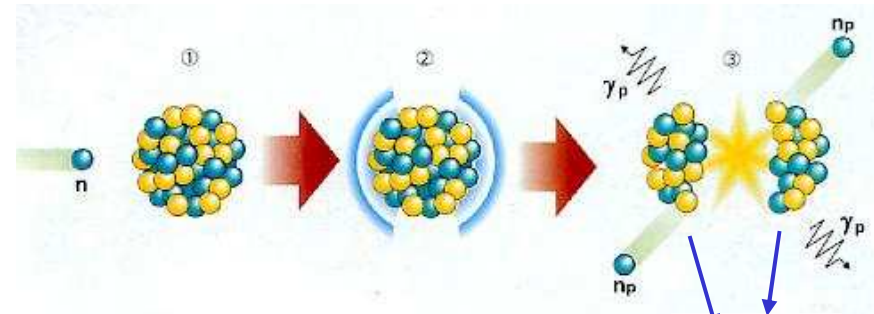
création d'un nouvel isotope
pouvant être instable (« activation »)

(a)

(b)

désintégration radioactive
(cas général)

Fission :
l'absorption d'un neutron par le noyau conduit à
la rupture du noyau en 2 (ou 3) noyaux plus petits
avec émission de 2 à 3 neutrons rapides
(en moyenne 2,63)
(énergie libérée : 200 MeV par fission)

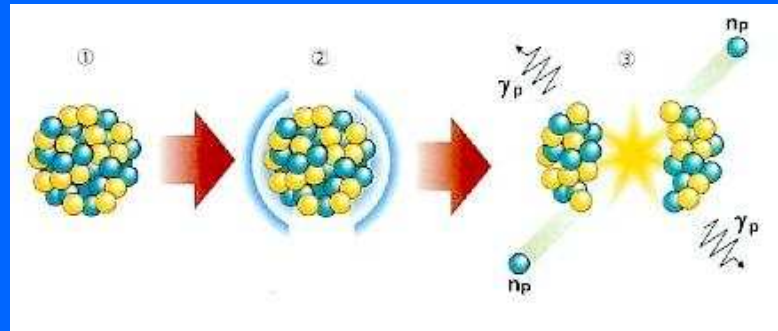


produits
de
fission

uniquement pour certains isotopes !

Uranium, plutonium : isotopes impairs (U^{233} , U^{235} , Pu^{239} , Pu^{241})

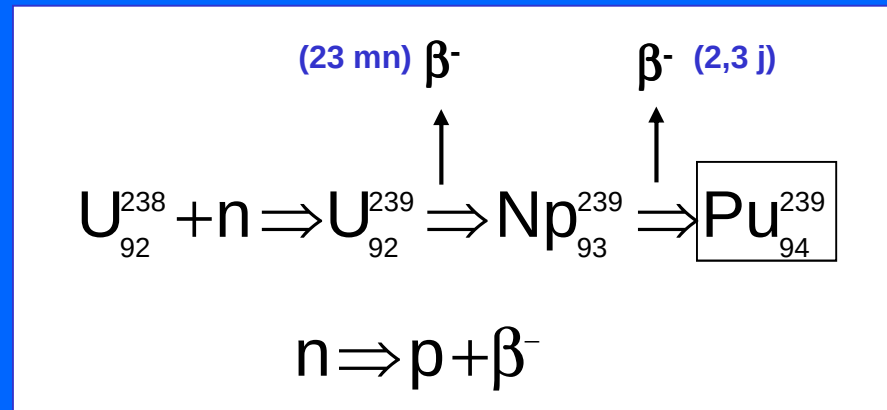
élément fissile : qui produit une fission par capture d'un neutron



U^{235} , U^{233} , Pu^{239} , Pu^{241}

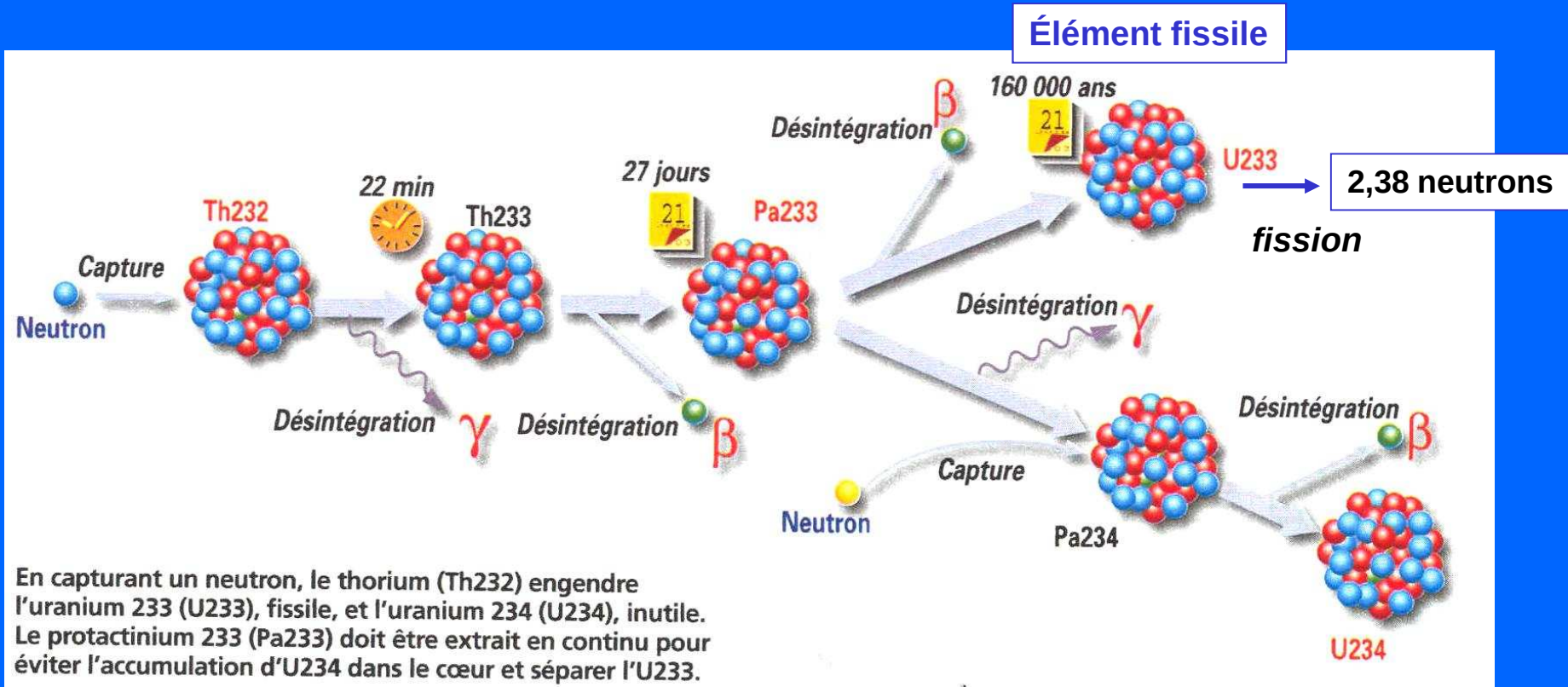
Les 2 (éventuellement 3) noyaux résultant de la fission sont les produits de fission (PF)

élément fertile : qui se transmute en un élément fissile par capture d'un neutron



U238 est faiblement fissile pour des neutrons très énergétiques (rapides)

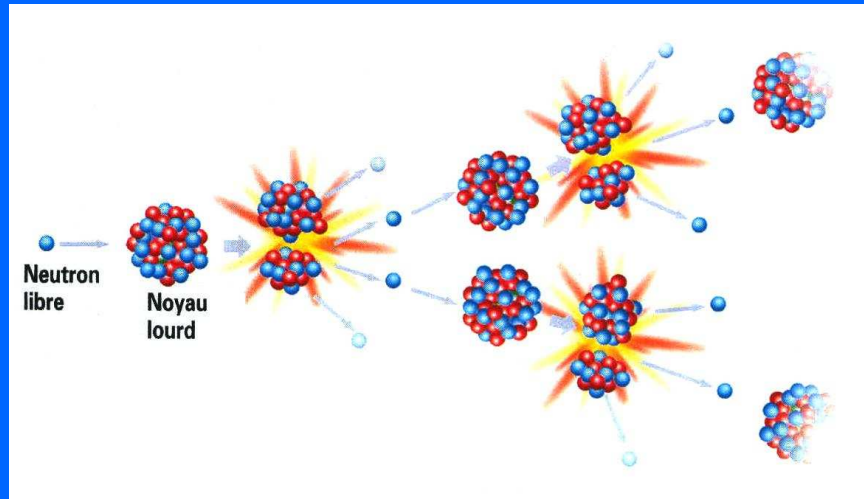
Autre exemple de capture fertile (à grand avenir !) : le thorium



Intérêt :

- le thorium est beaucoup plus abondant que l'uranium (x10)
- l'isotope Th^{232} représente 100% (U^{235} : 0,7%)

L'émission de plusieurs neutrons entraîne une « réaction en chaîne » pouvant dans certaines conditions devenir explosive si elle n'est pas contrôlée (bombe A)



*La durée entre 2 fissions est de l'ordre de la nanoseconde (10^{-9} sec)...
Avec une moyenne de 2,63 neutrons libérés à chaque fission, au bout de 60 ns, le nombre total de fission peut atteindre au maximum $3,5 \cdot 10^{25}$ (soit 6kg d'uranium), l'énergie libérée étant de $8 \cdot 10^{14}$ Joules ! (environ 200 millions de kWh ou $2 \cdot 10^4$ tep)*

Dans un réacteur, on contrôle le flux neutronique de façon à être toujours en régime critique (réaction en chaîne contrôlée)

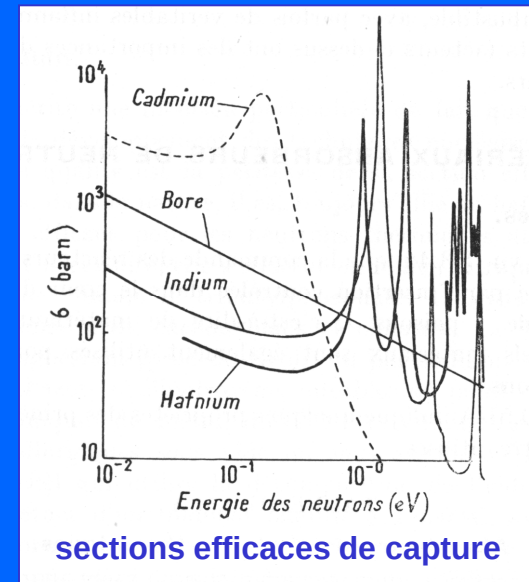
- sous critique : le nombre de fission diminue à chaque génération
- critique : le nombre de fission est constant
- sur-critique (réaction en chaîne explosive)

100 neutrons émis	→	{	38 fissions (x2,63)	→	100 neutrons
			29 captures fertiles		
			33 absorptions		

Contrôle du flux neutronique :

- poisons solubles dans l'eau primaire (acide borique)
- grappes de réglages et de contrôle :
alliages 80%Ag - 15% In - 5% Cd
- poisons consommables :
verres au borosilicates (12,5% B₂O₃)

Ces verres se détruisent progressivement pour compenser l'apparition du Sm (produit de fission poison)



Modérateur : sert à ralentir les neutrons : de rapide (>1 MeV) à thermique (<1 eV) pour augmenter la probabilité de capture par l'U²³⁵ et réduire celle par l'U²³⁸

- REP (PWR), BWR : eau légère
- graphite-Gaz (UNGG, Magnox) et U naturel : graphite
- RBMK (eau bouillante) : graphite
- CANDU : eau lourde
- Surgénérateur (Phénix, Super-Phénix) pas de modérateur (neutrons rapides)

UNGG : Uranium Naturel Graphite Gaz (France)

RBMK : Russie

Magnox : Uranium Naturel Graphite Gaz (GB)

CANDU : Canada

PWR : eau sous pression (VVER : Russie)

BWR : eau bouillante

1 g d 'Uranium = 22778 kWh = 0,949 MWj

Devenir de 100 neutrons émis (REP classique) :

- 2 sortent du cœur (absorption dans la cuve...)
- 18 sont absorbés hors combustible
 - 3 dans la gaine
 - 6 dans les barres de contrôle
 - 3,5 dans l'eau
 - 3 dans les « poisons » (Xe, Sm...)
- 80 sont absorbés dans le combustible

L'énergie totale est fournie par :

51,3% U235
8,3% U238
35,3% Pu239
5,1% Pu241

26 dans **U235** ➡ 21 fissions
5 captures ➡ U236

28 dans **U238** ➡ 3 fissions
25 captures fertiles ➡ Pu239 (fissile)

19 dans **Pu239** ➡ 12 fissions
7 captures ➡ Pu240

4 dans **Pu240** ➡ 4 captures fertiles ➡ Pu241 (fissile)

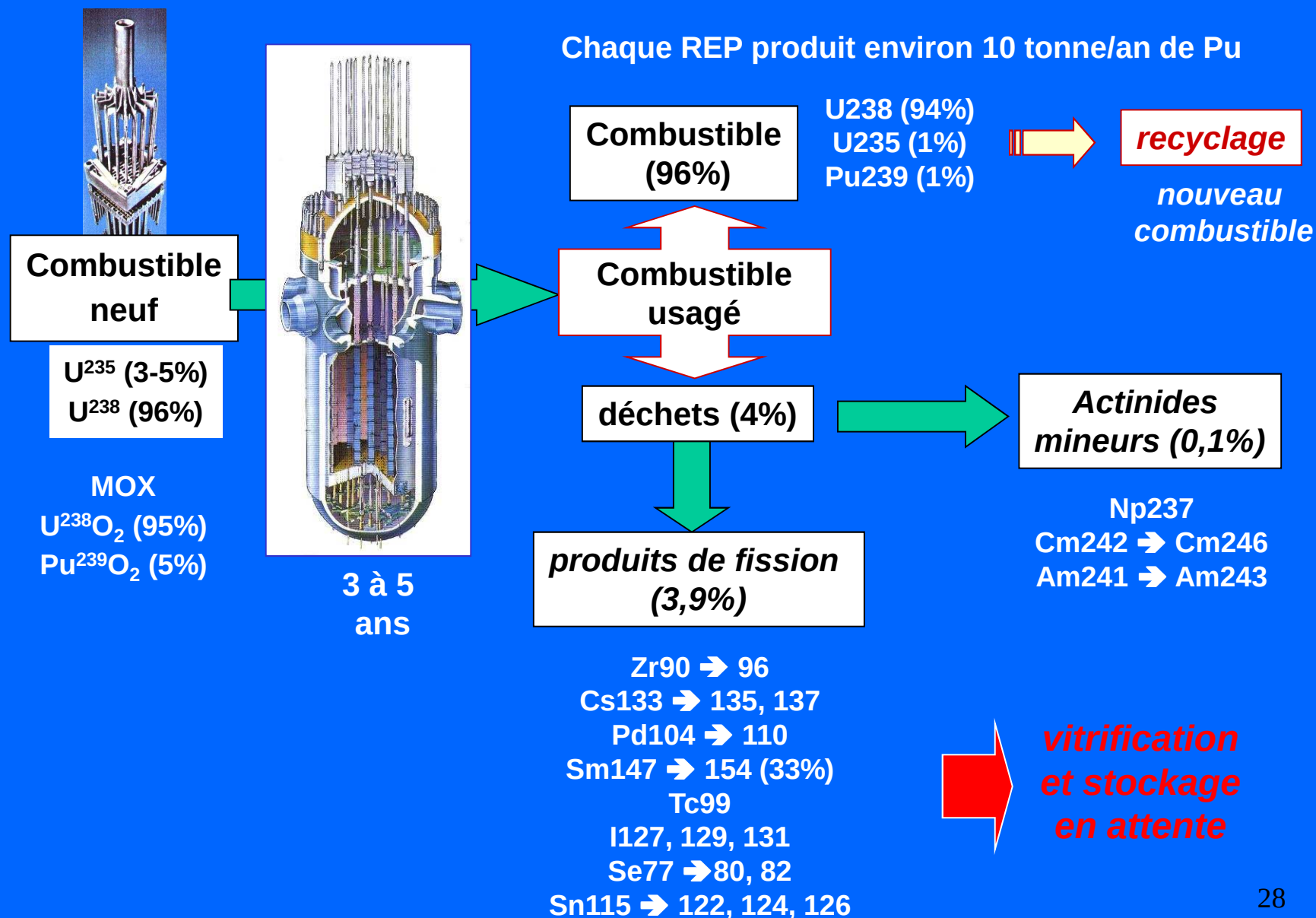
2,5 dans **Pu241** ➡ 1,8 fission
0,7 capture ➡ Pu242

0,5 dans **Pu242 et U236**

38 fissions
et
29 captures fertiles

A raison de 2,63 neutrons libérés par fission, on retrouve bien $38 \times 2,63 = 100$ 27

Cycle du Combustible dans une centrale nucléaire



Les déchets nucléaires

Par an en France et par habitant :

1800 kg déchets inertes
700 kg déchets industriels
500 kg ordures ménagères
100 kg déchets toxiques
1 kg déchets nucléaires

900 g de très faible activité
90 g de moyenne activité
10 g de très haute activité

95% industrie nucléaire

2,5% domaine de la santé

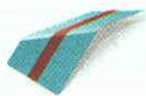
2,5% recherche universitaire

Par TWh (10^9 kWh) on produit 30 kg de Pu
et 3 kg d'actinides (Np, Am, Cm...)
production électrique française : 560 TWh
dont 440 d'origine nucléaire

Les objets ont la vie dure

Chaque objet possède une durée de vie. Quand on l'abandonne dans la nature, il se décompose en un temps donné, souvent bien plus long que ce que l'on imagine.

2 à 4 semaines



Ticket de métro

moins de 1 an



Peau de banane

1 an



Chaussette en laine

1 à 4 ans



Morceau de bois naturel

2 à 5 ans



Papier de bonbon

13 ans



Morceau de bois peint

100 ans



Couvercle en acier

200 à 400 ans



Emballage en aluminium

450 ans

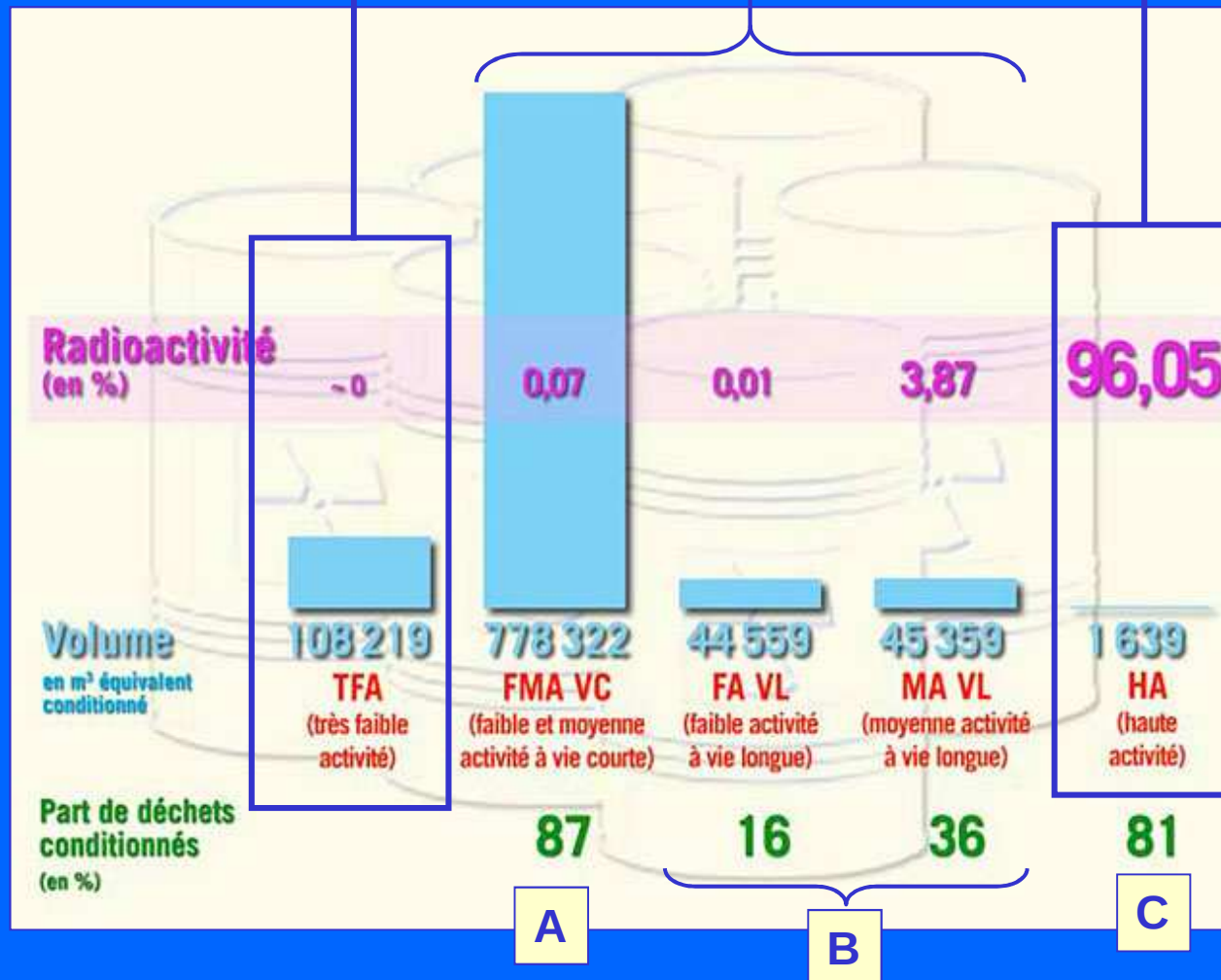


Emballage en plastique

Container béton
stockage en surface
(Morvilliers – Aube)

Container béton
stockage en surface
(Soulaines – Aube)

Vitrification
Stockage à la Hague
en attente de décision



Loi bataille (30/12/91) :

- 3 axes de recherche
(1992-2006)
- Stockage en sub-surface
 - Stockage profond
 - Incinération

Projet de Transmutation (« incinération »)

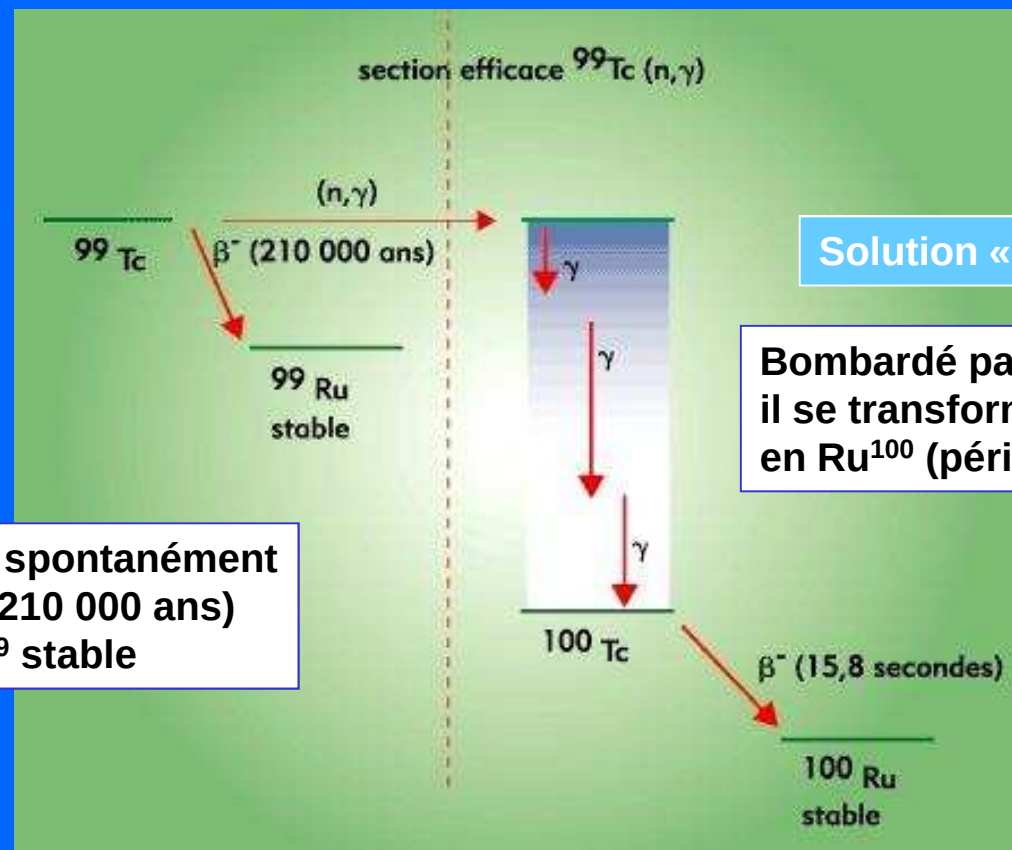
Le but est de transmuter certains radioéléments à vie longue en éléments à vie courte ou stable par bombardement neutronique, soit dans des RNR, soit dans des réacteurs hybrides.

exemple : ^{99}Tc

PF très actif

Actuellement :

se transforme spontanément
(période de 210 000 ans)
en ^{99}Ru stable

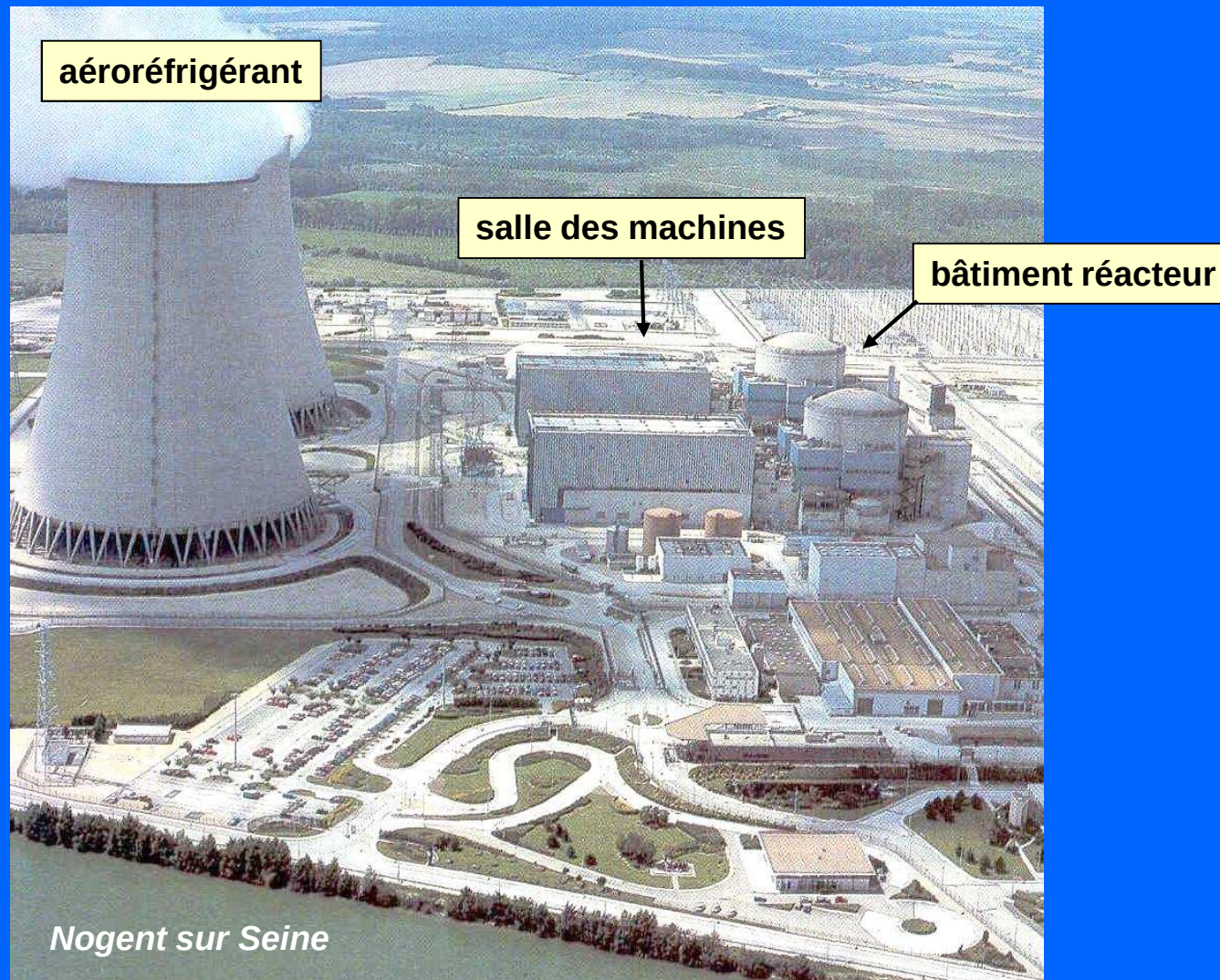


Solution « transmutation »

Bombardé par des neutrons,
il se transforme en Tc^{100} , puis
en Ru^{100} (période 15,8 secondes)

Les possibilités d'incinération des principaux actinides (Np, Am, Cm) est en cours

III – Applications de la fission : Les centrales électro-nucléaires



Centrale nucléaire à eau légère pressurisée (REP 1300MW)

Comparaison des performances de quelques sources d'énergie

Pour obtenir l'équivalent de la production annuelle
d'un réacteur nucléaire de 1200 MWe (disponibilité 85%)
(soit une énergie de 8 milliards de kWh)
il faut :

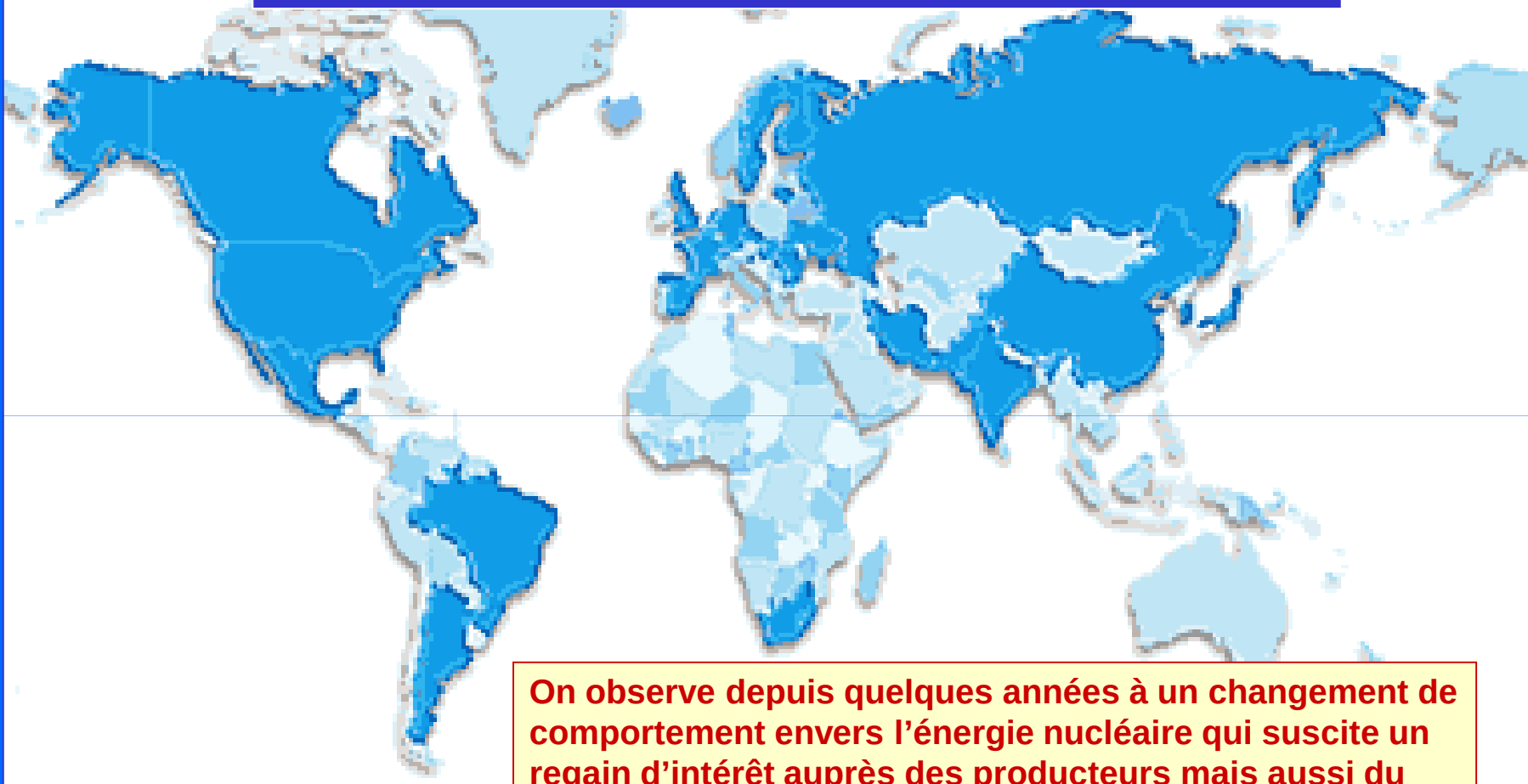
photovoltaïque	100 kilomètres carrés (rendement : 10 %, Europe centrale)
éolien	5 600 éoliennes (disponibilité de 30 %, Mer du Nord)
charbon	2 600 000 tonnes
pétrole	1 800 000 tonnes
fission nucléaire	25 tonnes d'uranium enrichi à 4 %
fusion thermonucléaire	100 kg de deutérium et 150 kg de tritium

(100 km² = 10⁶ hectares)

France : moyenne <25%

L'énergie nucléaire dans le monde

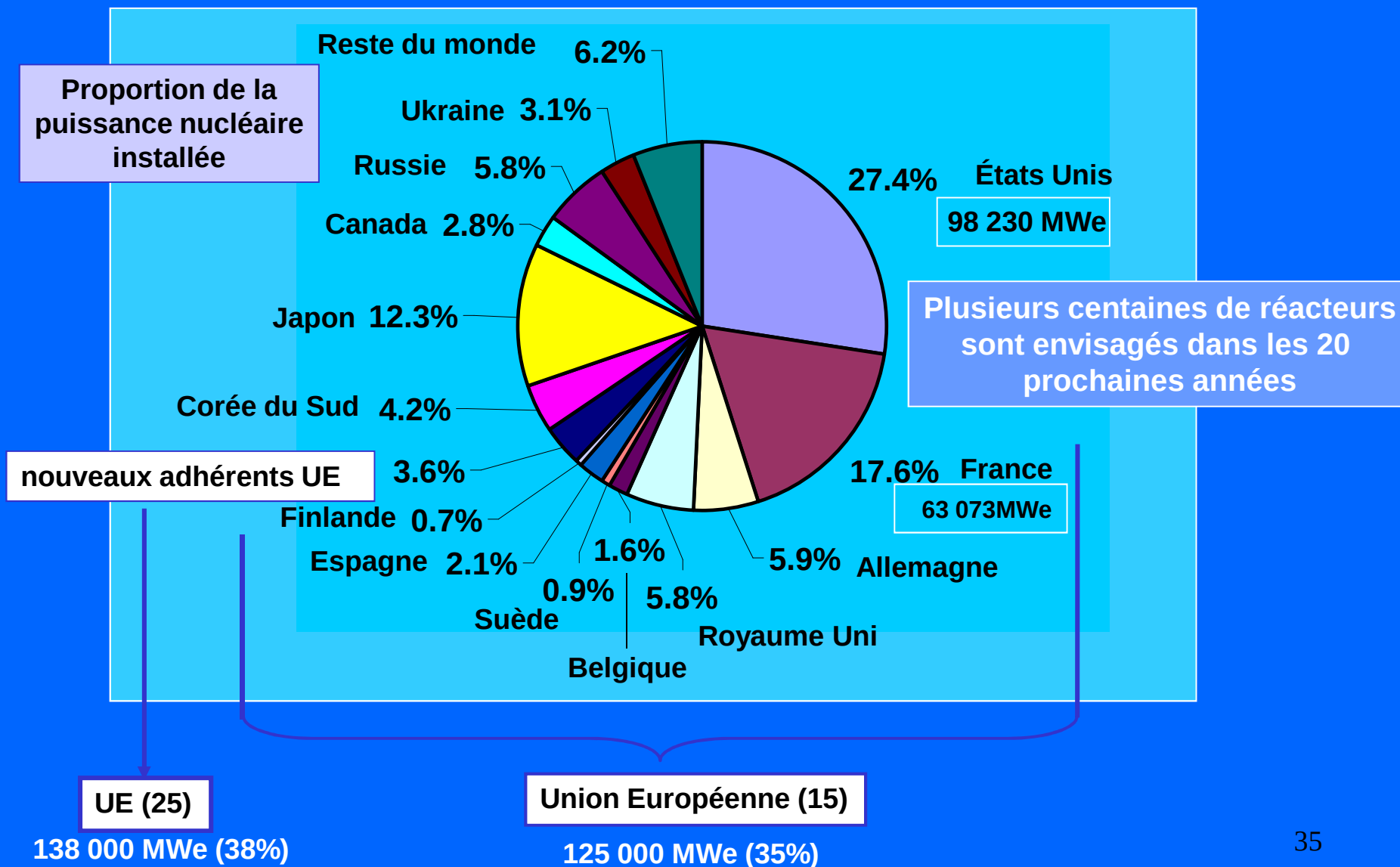
Pays utilisant l'énergie nucléaire pour la production d'électricité :



On observe depuis quelques années à un changement de comportement envers l'énergie nucléaire qui suscite un regain d'intérêt auprès des producteurs mais aussi du grand public...

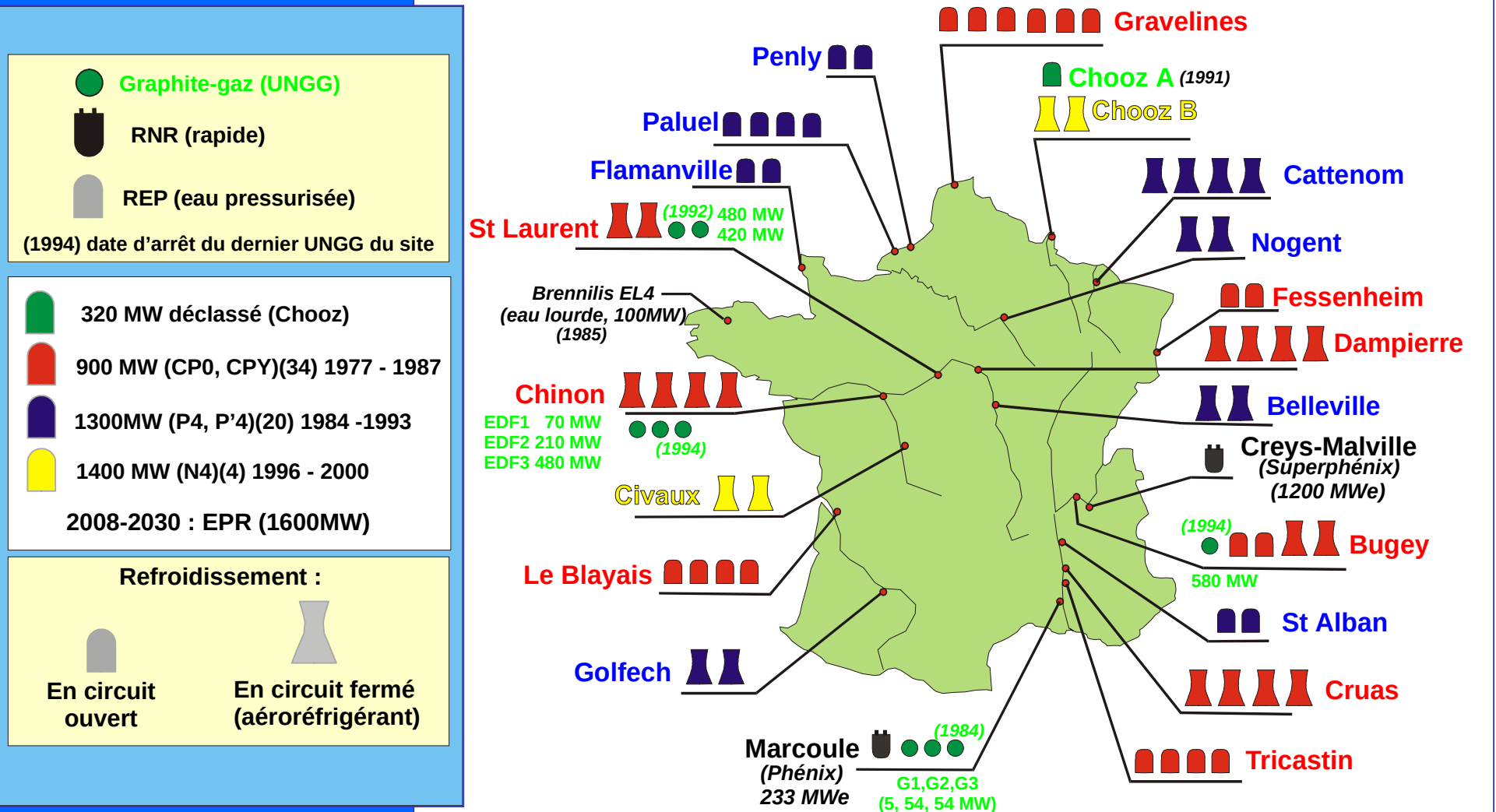
Les prises de positions officielles en faveur du nucléaire, de personnalités comme James Lovelock, fondateur de l'écologie, Patrick Moore, co-fondateur de Greenpeace... sont de plus en plus fréquentes...

441 réacteurs en fonctionnement, 32 en construction
puissance installée : 358 611 MWe
23% de la production électrique, 7% de la production totale d'énergie

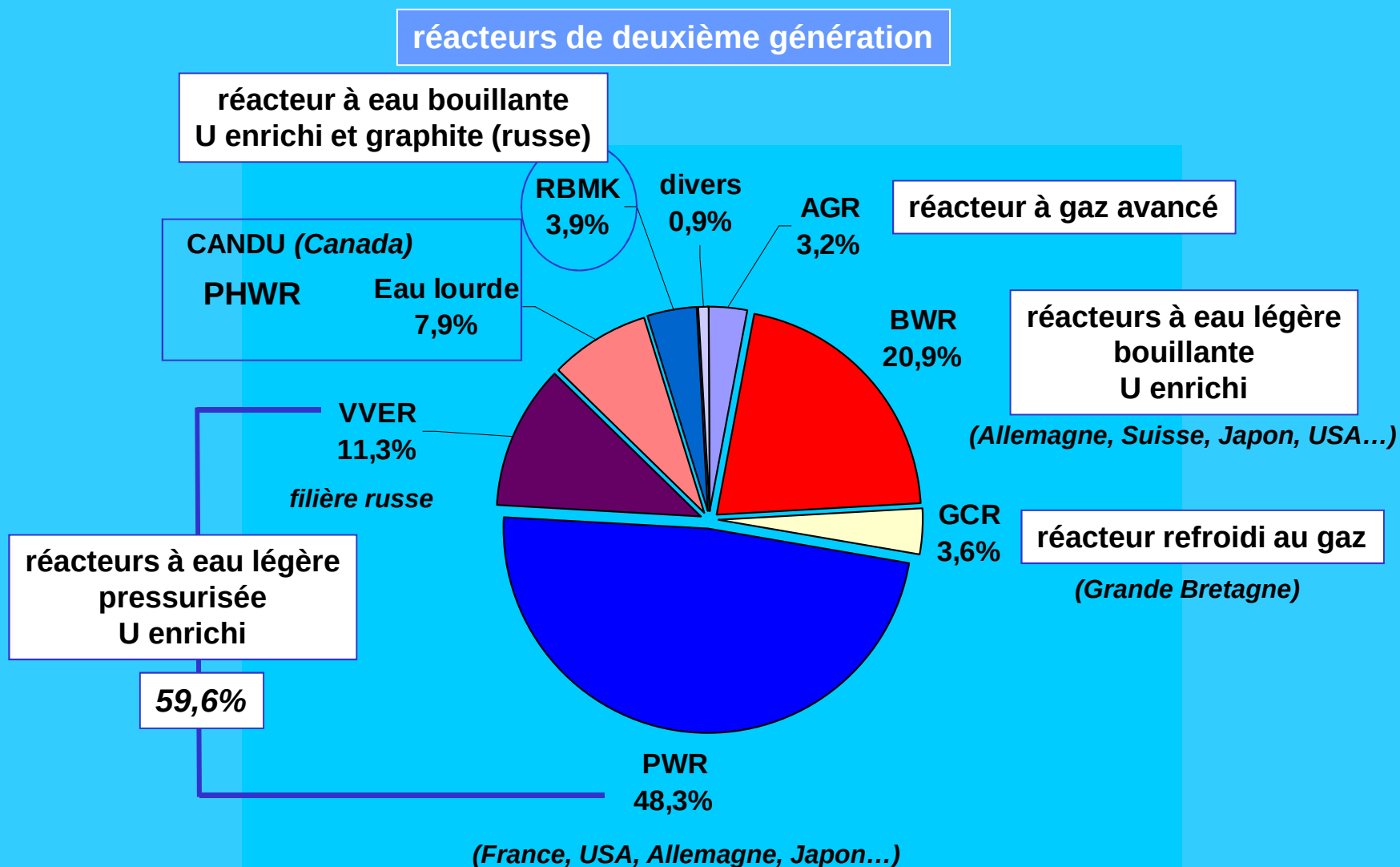


Le programme électronucléaire français

58 tranches opérationnelles – Capacité totale : 63500 MWe
 (11 tranches déclassées 2770 MW, 1 tranche à l'arrêt 1200 MW)
 1 réacteur EPR (1600MWe) en construction (Flamanville)



Les différentes filières utilisées dans le monde

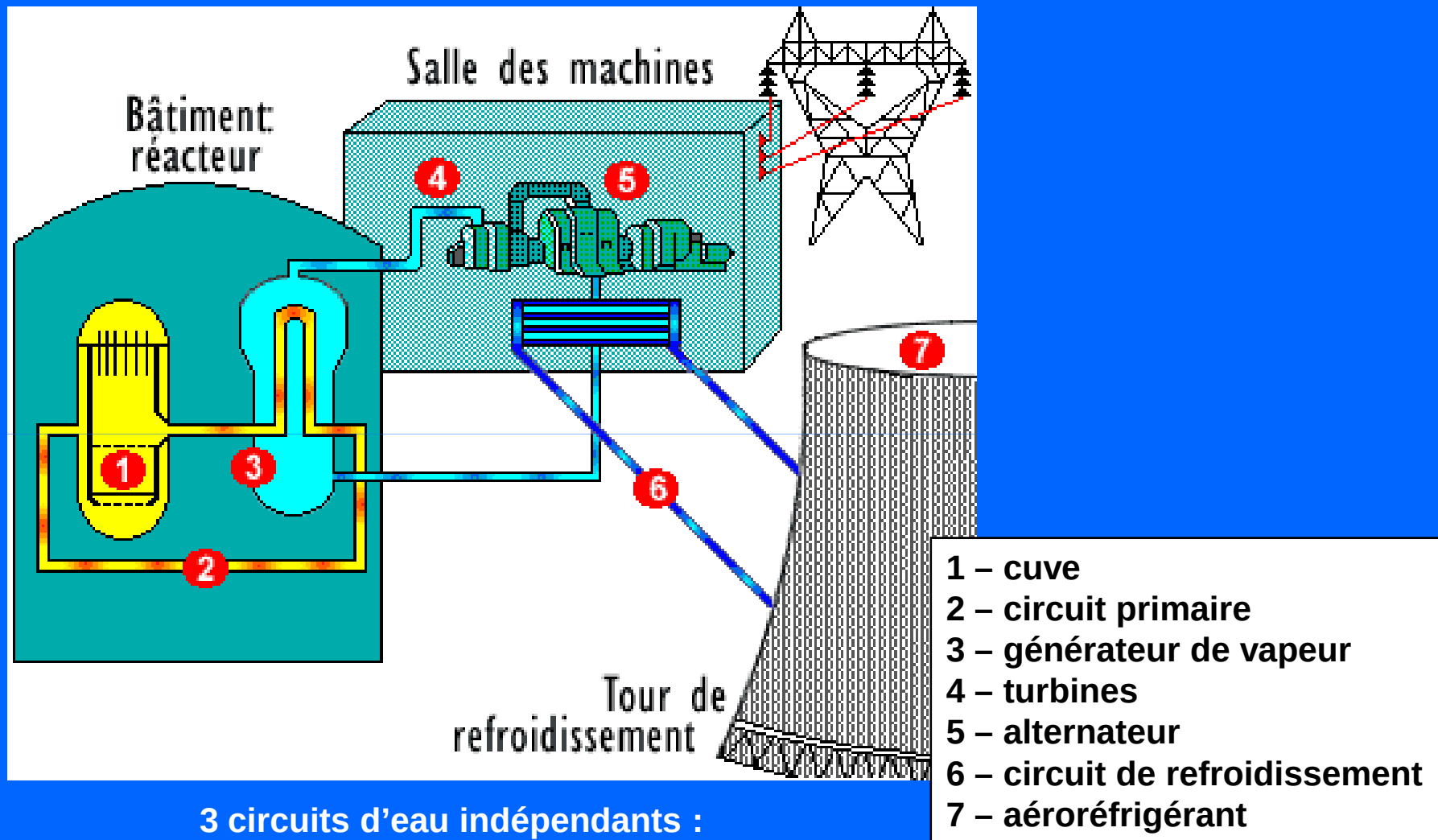


3ème génération : 2010 (EPR)

4ème génération : 2040 (HTR, VHTR, sels fondus, RNR...)

III.1 - Le réacteur nucléaire à eau légère pressurisée (PWR ou REP)

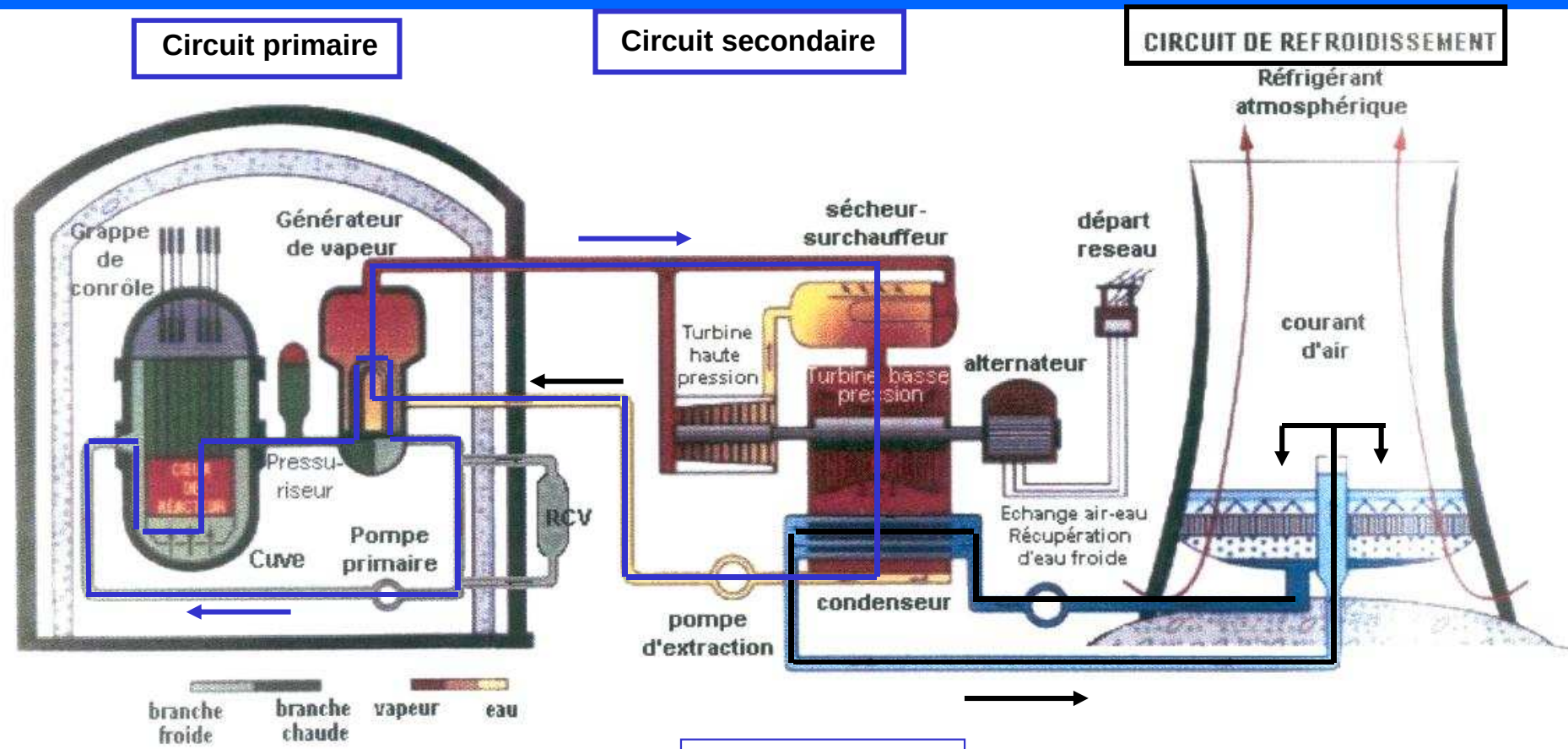
263 réacteurs dans le mode entier (dont 58 en France)



3 circuits d'eau indépendants :

- circuit primaire (eau sous pression 155 bars, 300°C)
- circuit secondaire (eau-vapeur 70 bars 280°C)
- circuit de refroidissement (condenseur 1 bar, 25°C)

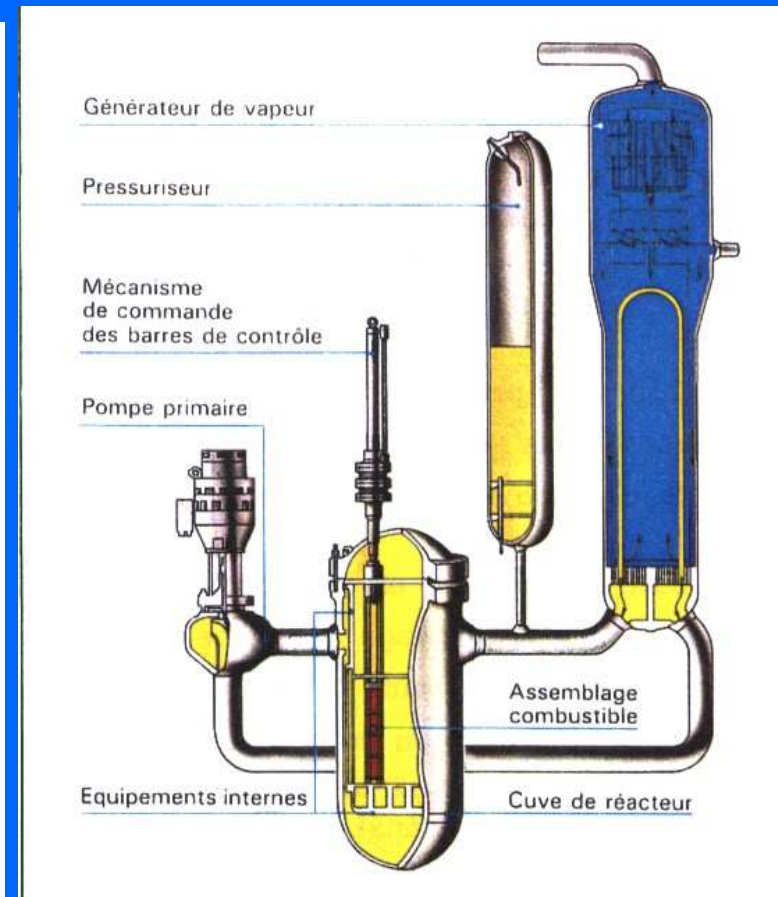
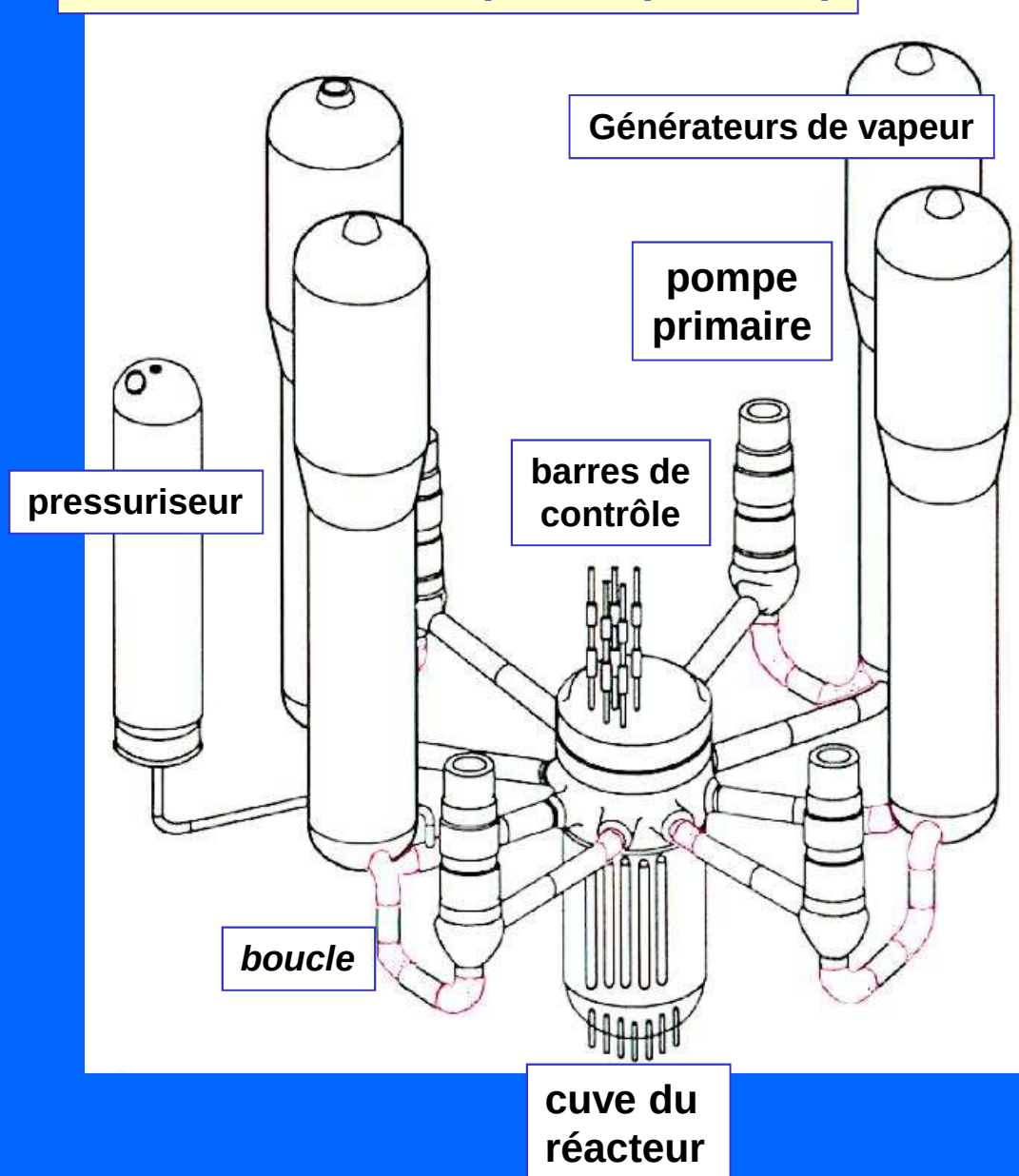
Schéma de principe d'un réacteur nucléaire à eau pressurisée (PWR ou REP)



eau sous pression
 293°C → 328°C
 155 bar
 16.000 m³/h

eau-vapeur
 238°C → 288°C
 71 bar
 7800 t/h (vapeur)

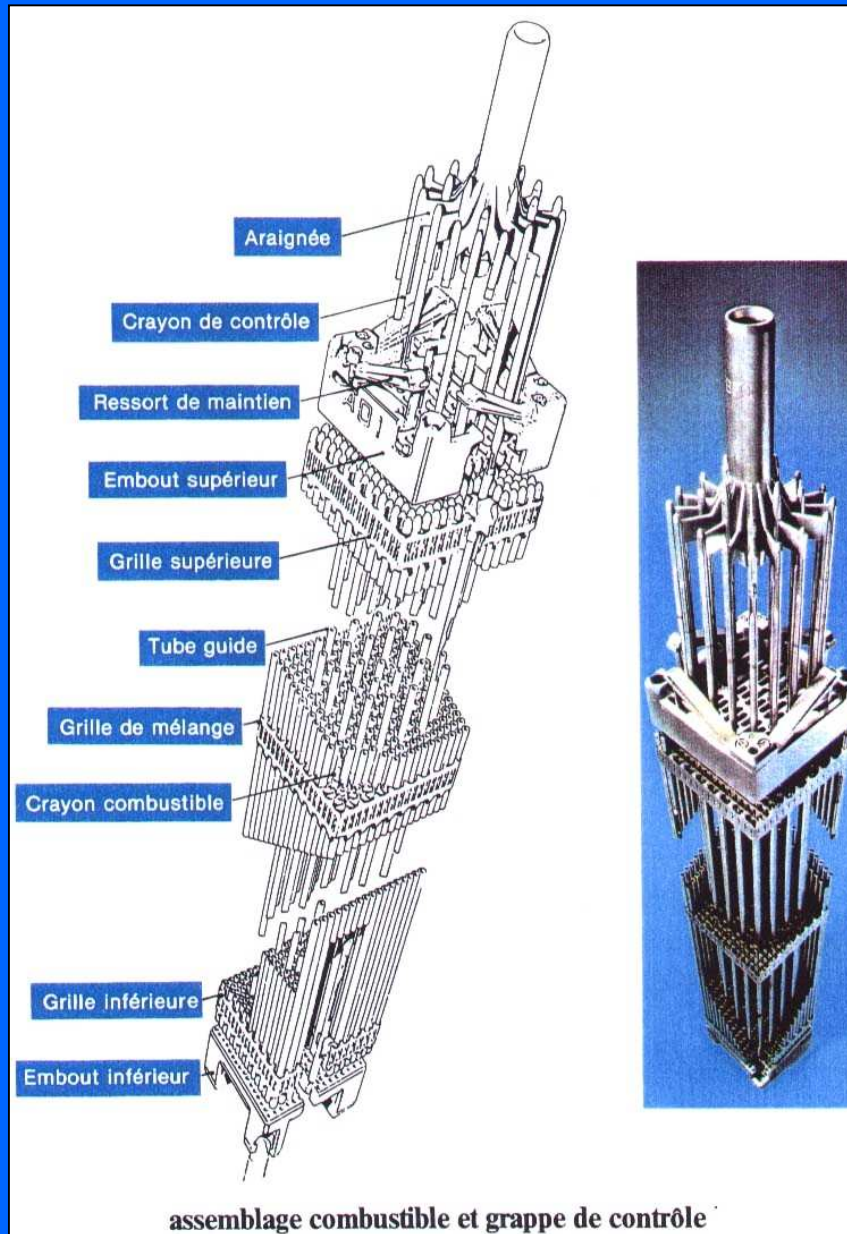
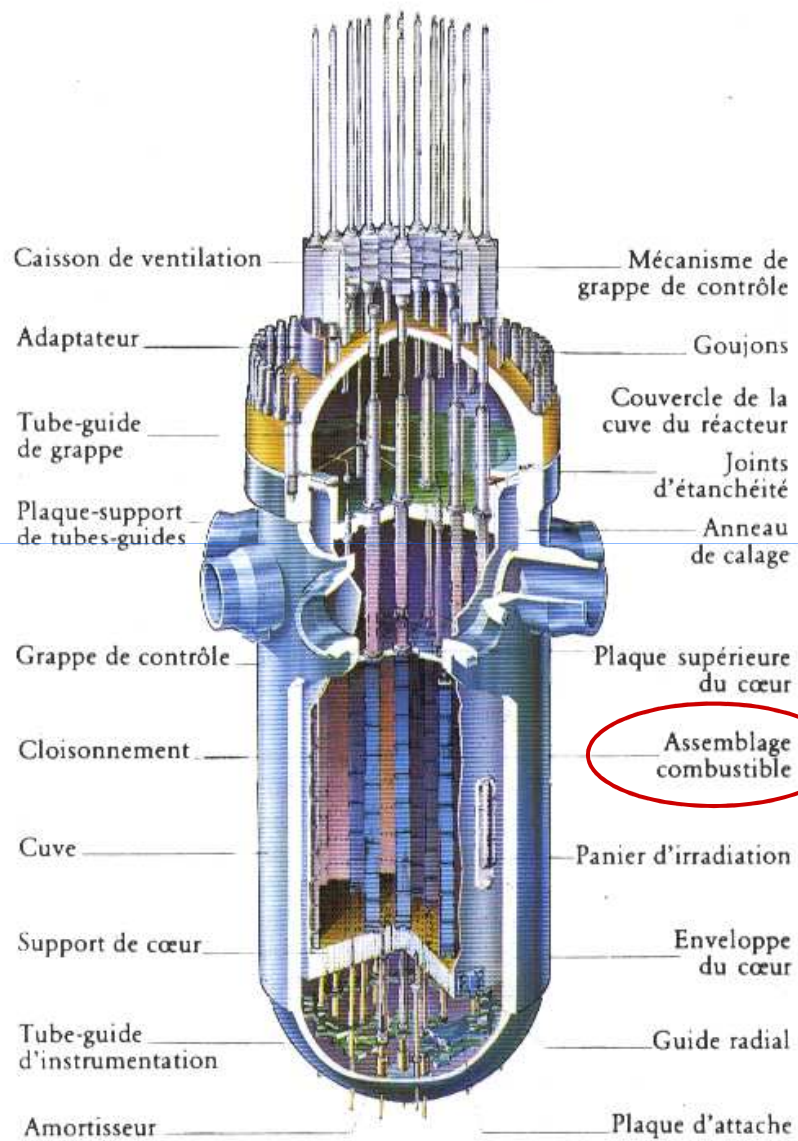
Bâtiment réacteur (circuit primaire)



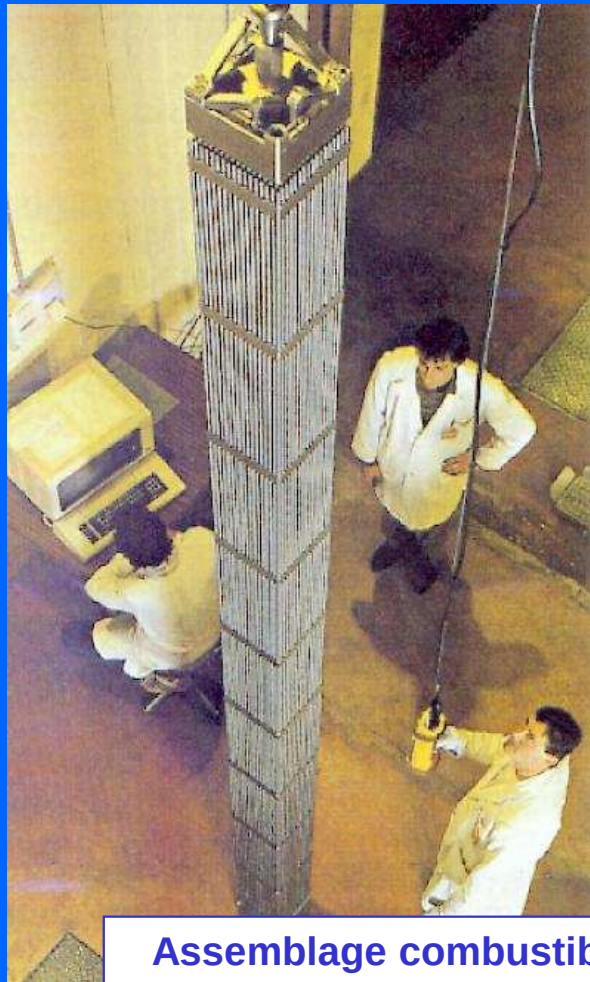
Réacteurs :

- 600 MW : 2 boucles
- 900 MW : 3 boucles
- 1200 MW : 4 boucles

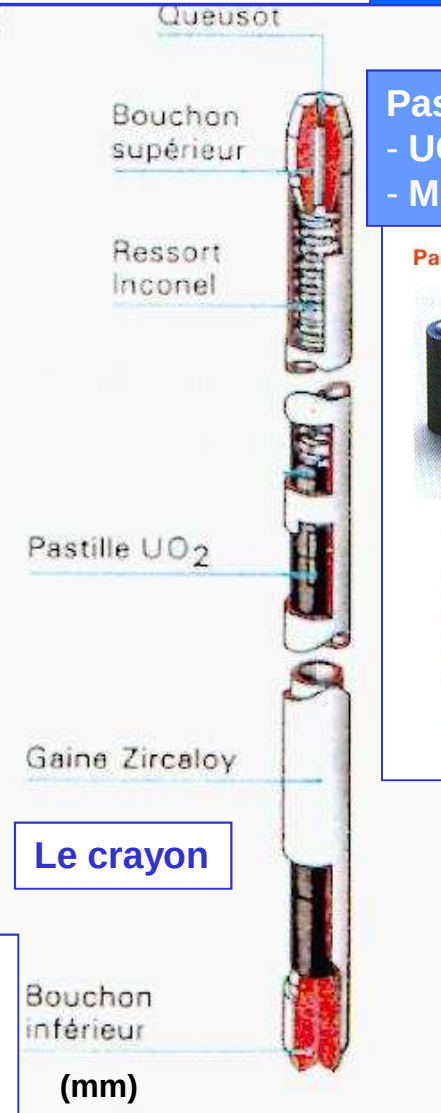
CUVE DU RÉACTEUR



Le combustible et les matériaux de gainage



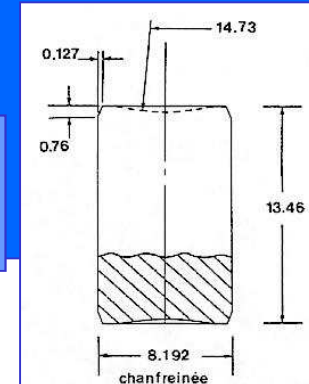
Assemblage combustible
264 crayons (17x17)
24 tubes guides
900 MW : 157 assemblages
1300 mW : 191 assemblages
265 pastilles par crayon
1,9 kg d'U par crayon



Le crayon

Pastilles combustibles :
- UO_2 (4% U^{235})
- MOX : +10 à 30% PuO_2

Pastilles combustibles

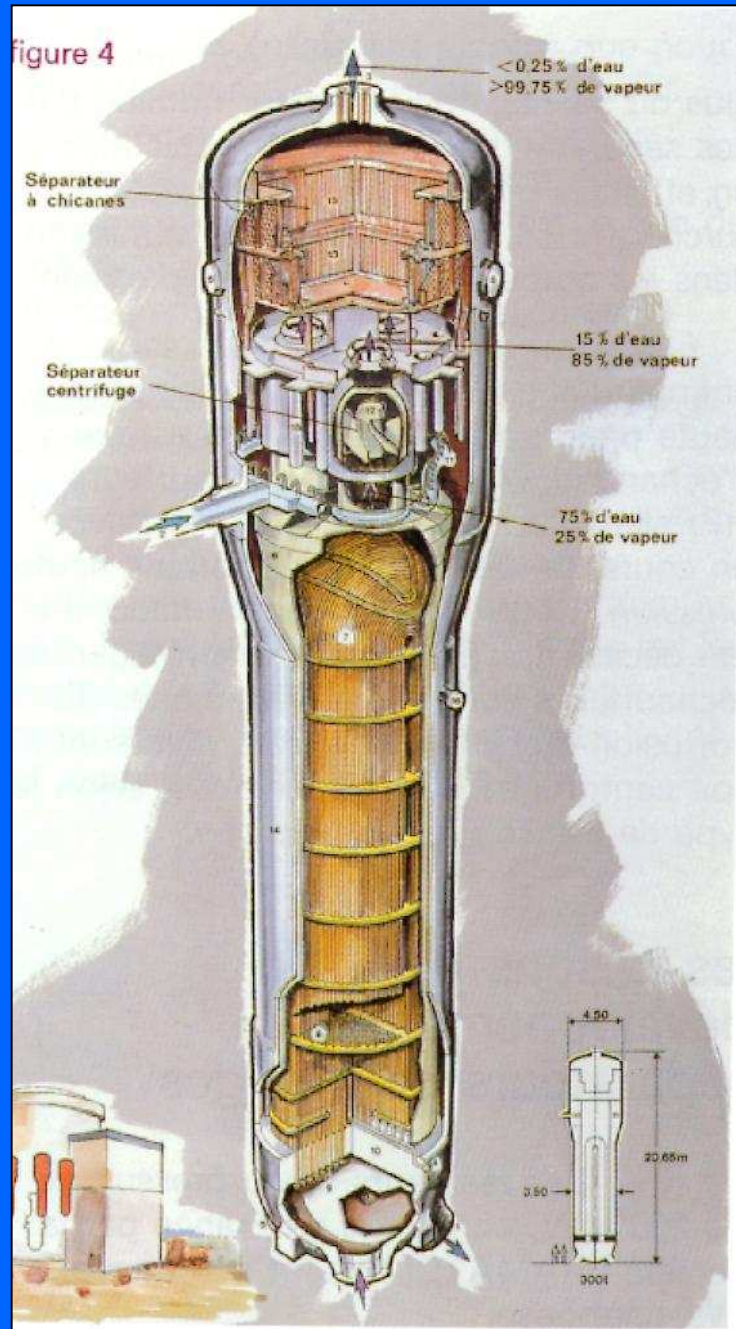


Tube de gainage en Zircaloy 4 ressorts et bouchons

**Gaine, bouchons..
en alliage de zirconium**

**Chaque année, on remplace 9.000 assemblages,
soit 2.400.000 crayons...**

figure 4



Générateurs de vapeur

Assure le transfert de chaleur entre l'eau du circuit primaire (328°C – 155 bars) et l'eau du circuit secondaire (238 → 288°C – 75 bars) qui se transforme en vapeur sous haute pression pour alimenter les turbines (HP, MP et BP) qui font tourner l'alternateur...

Circuit primaire :

pression : 155 bar
température d'entrée : 293°C
• température de sortie : 328°C
• débit d'eau : 64.000 m³/h

Circuit secondaire (4) :

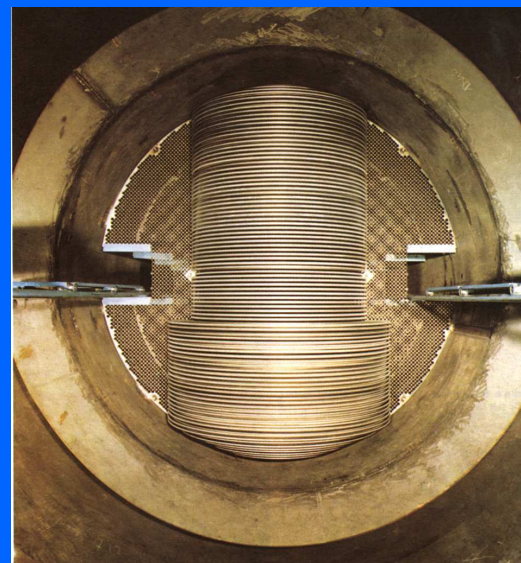
pression de vapeur : 71 bar
température d'entrée : 238°C
température de sortie : 288°C

turbines :

vapeur : 7800 t/h (67,5 bar)
vitesse : 1500 tr/mn

alternateur :

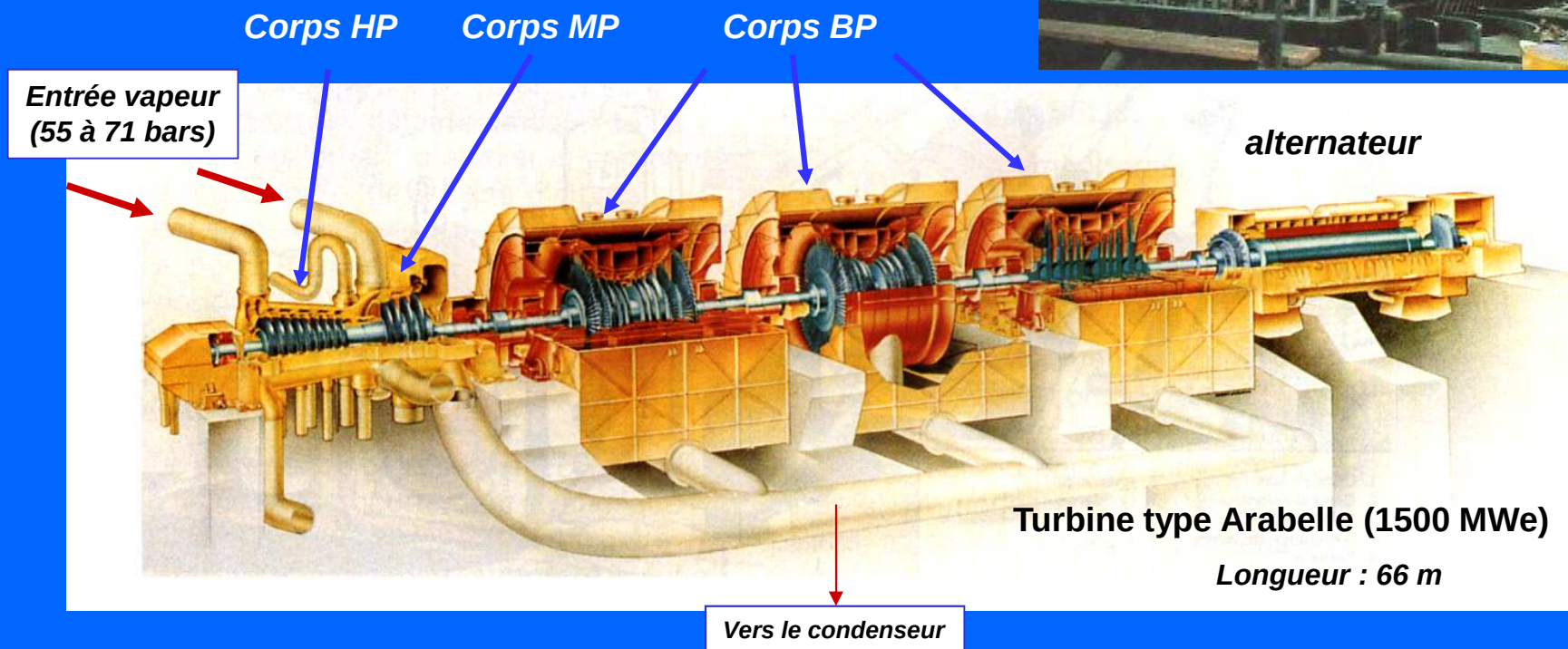
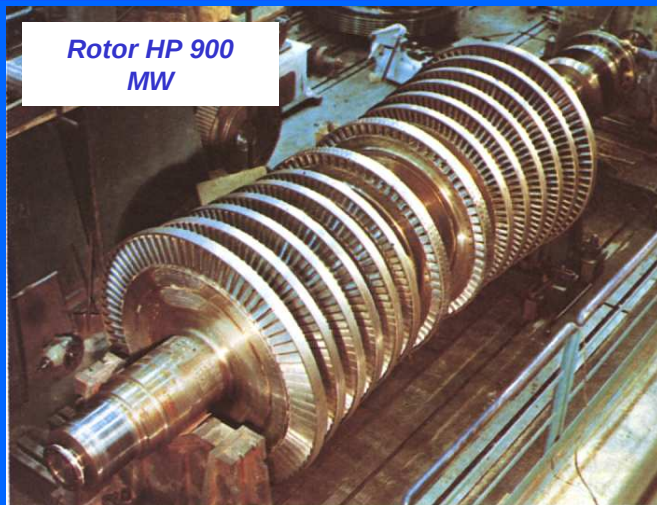
1650 MVA
1345 MW
20kV



Vue de dessus d'un GV en construction

Salle des machines

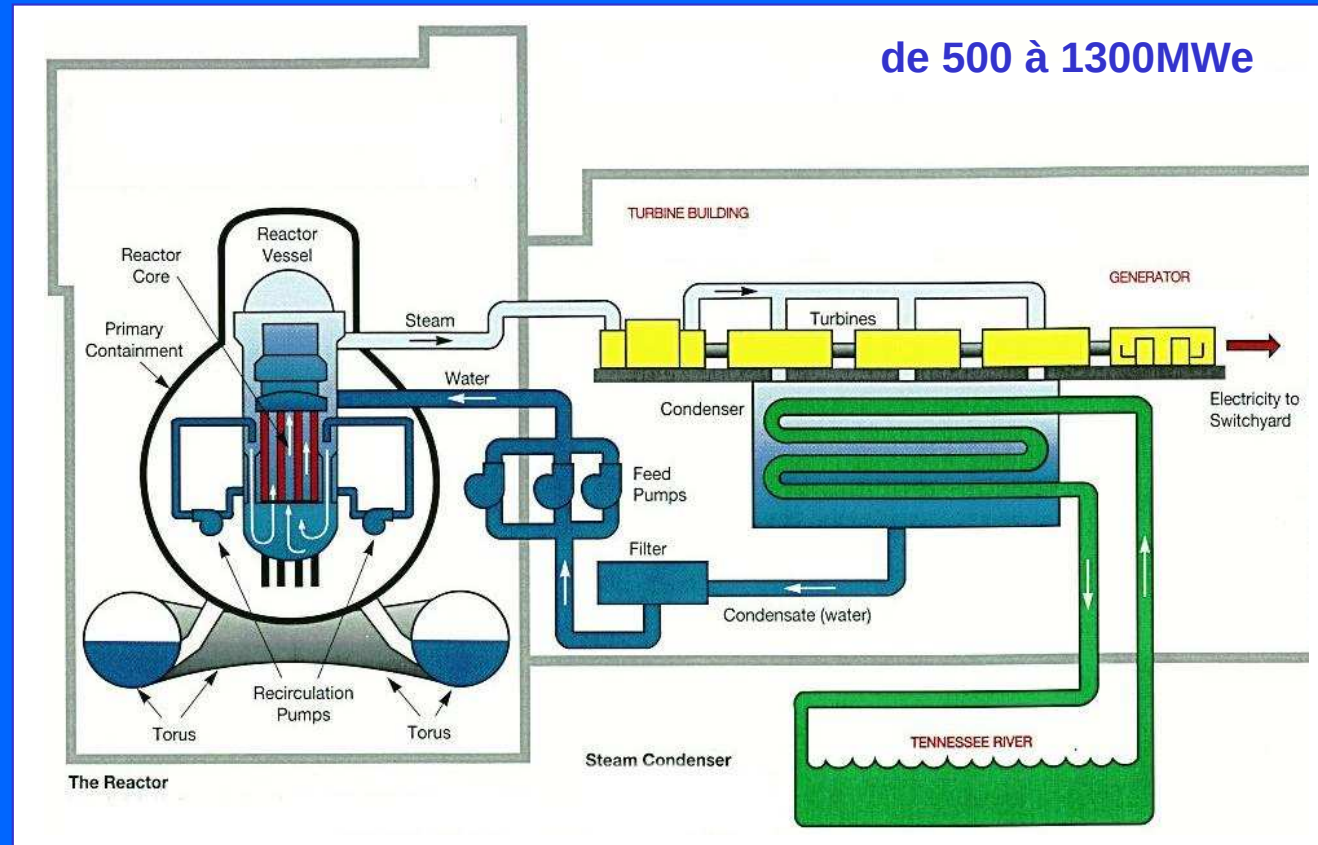
Turbines + alternateur



III.2 - Le réacteur nucléaire à eau bouillante (BWR ou REB)

Conçus par General Electric

de 500 à 1300MWe



Uranium enrichi

92 réacteurs :

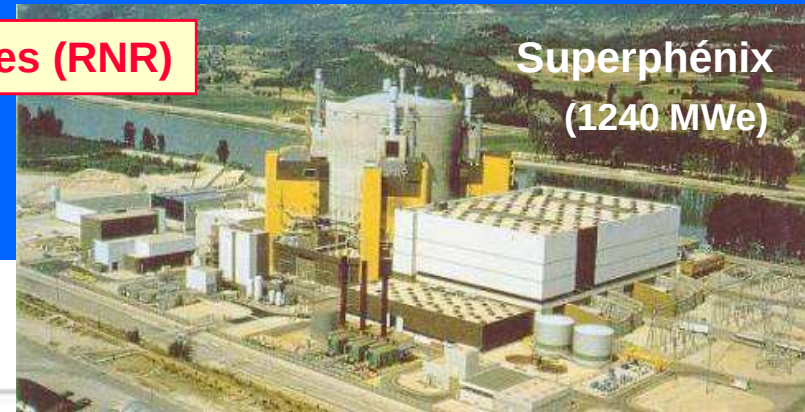
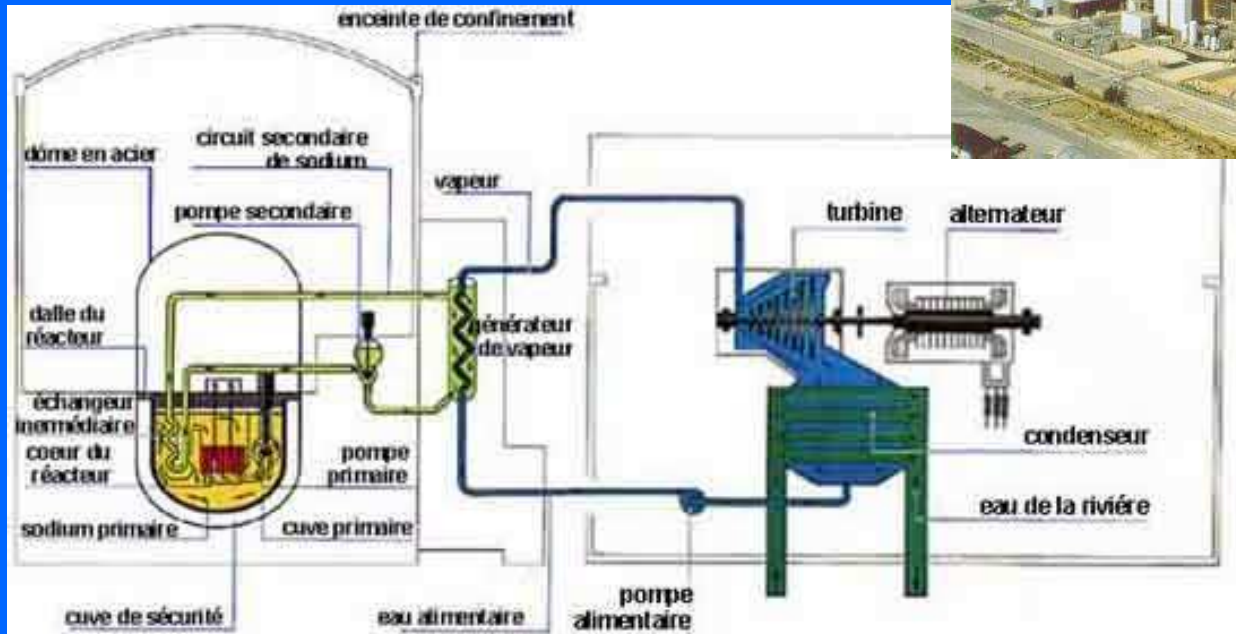
USA
Finlande
Allemagne
Inde
Japon
Mexique
Pays bas
Espagne
Suède
Suisse
Taiwan

La vapeur est directement produite dans le cœur du réacteur

avantages : pas de pression élevée
inconvénient : pas de circuit secondaire

III.3 - Le réacteur nucléaire à neutrons rapides (RNR)

Utilisation de neutrons rapides
(pas de modérateur)



fluide caloporteur :
sodium (double circuit)

France :

- Superphénix
(en cours de démantèlement)
- Phénix (250MW) (30 ans)

Avantages :

- Utilisation directe du Pu
- Surgénération : production de Pu à partir de l' U^{238}
(augmentation par 100 des ressources en U)
- Destruction des actinides par irradiation

Inconvénients :

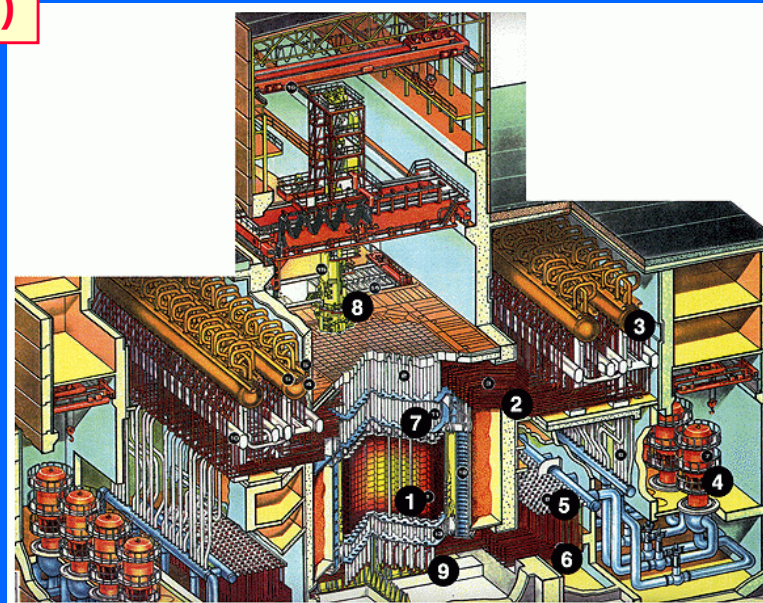
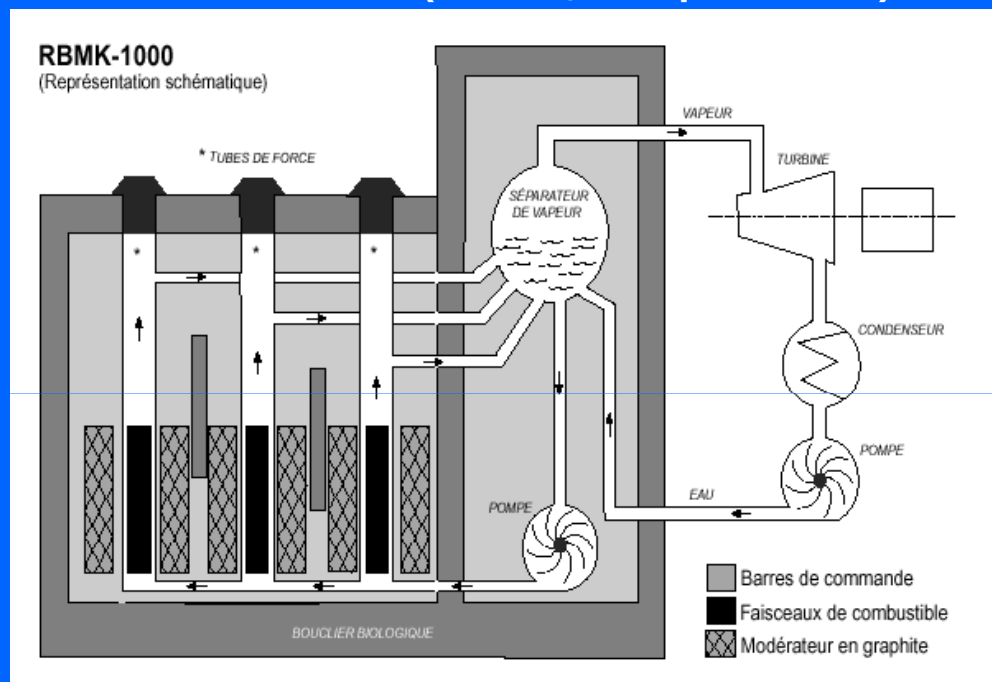
- filière Pu
- présence de Na

plusieurs RNR sont en construction
dans le monde (Inde, Japon...)

III.4 - Les réacteurs nucléaires RBMK (filiale russe)

Destinés à la production d'électricité
et de Pu à usage militaire

17 réacteurs (Russie, Europe de l'Est)



Le combustible est dans des
tubes (de force) en alliage de Zr
et dans lesquels circule l'eau.
Entre les tubes :
blocs modérateurs en graphite

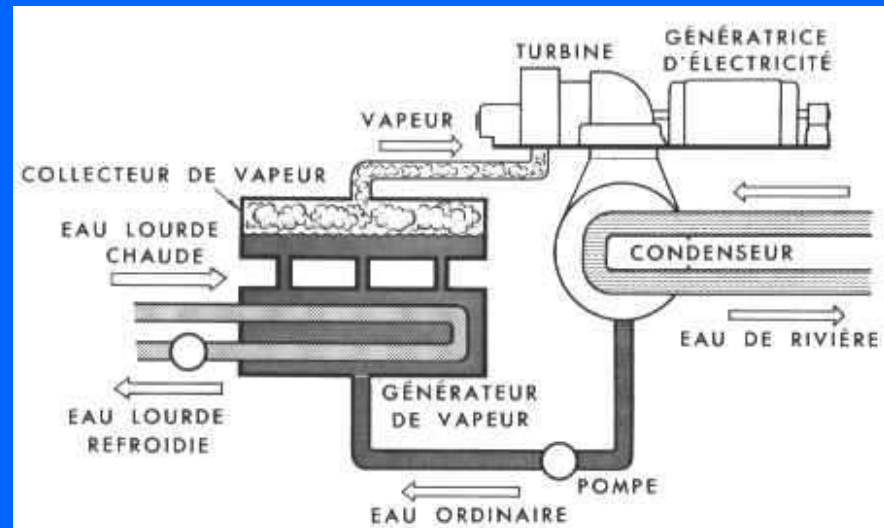
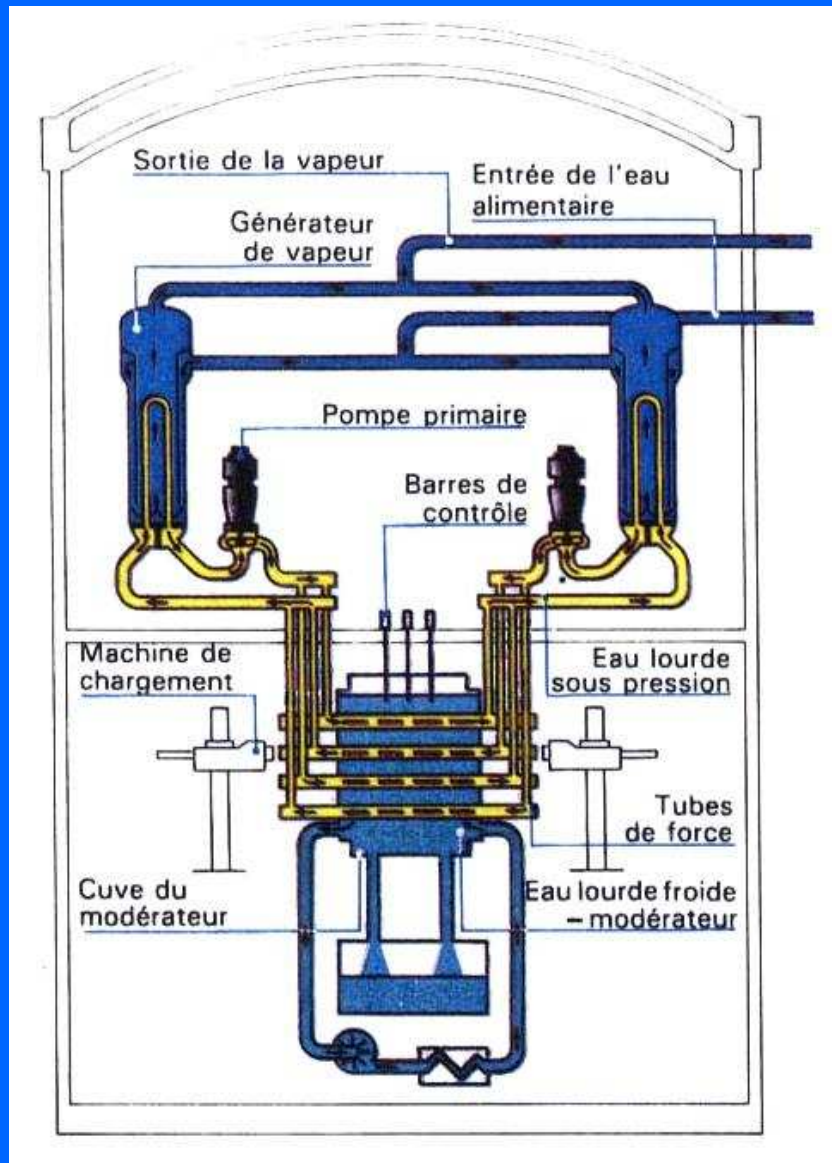
- Uranium enrichi
- eau légère
- modérateur graphite

Inconvénients :

- pas d'enceinte de confinement
- forte instabilité à bas régime
- coefficient de bulles de vapeur positif

Après l'accident de Tchernobyl, plusieurs modifications ont été apportées
à ces réacteurs pour améliorer leur sécurité

III.5 - Les réacteurs nucléaires CANDU (filière canadienne)



Filière développée par le Canada :

- uranium naturel
- modérateur et fluide caloporteur : eau lourde

génération 2 (Candu 6) : 700 MWe

génération 3 (Candu 9) : 1000 MWe

35 réacteurs en service :

22 au Canada

13 ailleurs (Argentine, Roumanie, Corée, Chine, Inde, Pakistan)

GENERATION III : l'EPR

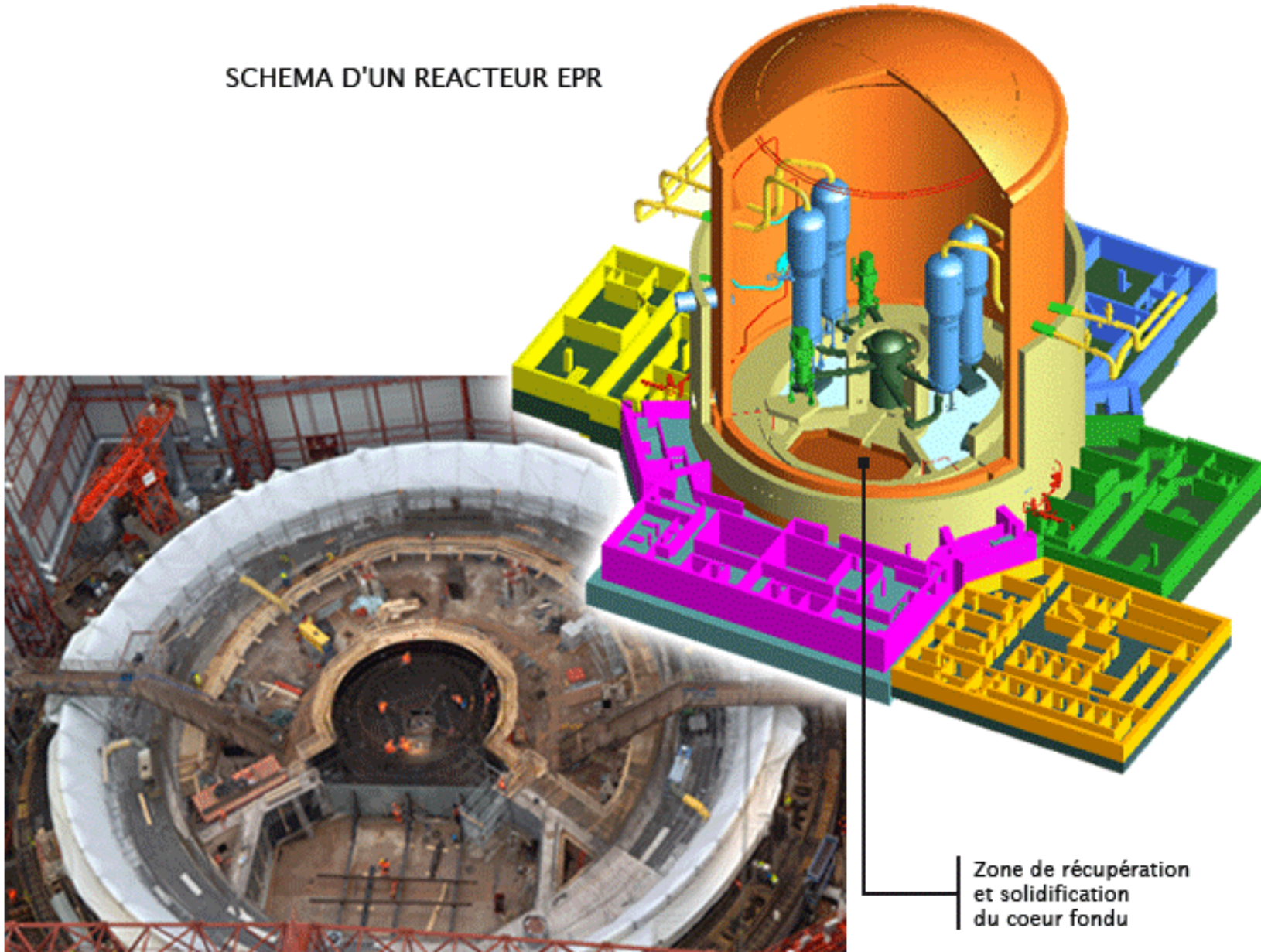
*Conçu par AREVA-SIEMENS-EDF
et les principaux électriciens allemands*



- 1 – Cuve
- 2 – générateurs de vapeur
- 3 – pressuriseur
- 4 – pompes primaires
- 5 – enceinte en béton (1,3 m)
- 6 – coque extérieure (1,3m)
- 7 – réservoir à corium
- 8 - salle de commandes
- 9 – bâtiment électrique
- 10 – salle des machines

Coût du réacteur : 3 milliards d'€

SCHEMA D'UN REACTEUR EPR



Construction d'un réacteur EPR (Finlande) - Crédit Photo : Areva ©2007

Principales caractéristiques		EPR
Puissance thermique	MW	4250/4500
Puissance électrique	MW	de 1500 à 1600
Rendement	%	36
Nb boucles primaires		4
Nb assemblages combustibles		241
Taux de combustion *	GWj/t	> 60
Pression secondaire	Bar	78
Niveau sismique	g	0,25
Durée de vie technique	années	60

Caractéristiques de l'EPR

Comparaison EPR – N4

	<u>EPR</u>	<u>N4</u>
Puissance thermique (MW)	4250 à 4500	4250
Puissance électrique (MW)	1500 à 1600	1450
Rendement	36%	34%
Taux de combustion (GWj/t)	60	45
Résistance sismique (accél. horizontale supportée)	0,25g	0,15g
Durée de vie annoncée (ans)	60	40

Avantages de l'EPR par rapport au palier N4

1 - Sûreté

- double enceinte en béton précontraint de 1,3 m d'épaisseur
(doit résister à la chute d'un avion militaire ou de ligne)
- quatre bâtiments auxiliaires protégés et pouvant assurer le fonctionnement indépendamment des 3 autres
- un recevable en céramique destiné à recevoir un cœur en fusion (corium)
- un radier en béton de 6 m d'épaisseur résistant à des séismes importants

2 - Économie

- enrichissement du combustible : 5% (au lieu de 3 – 4 %)
 - taux de combustion : 60 000 MWj/tonne au lieu de 45 000 MWj/tonne
(ce qui permet une combustion de 6,5%)
- ⇒ gain en combustible : 25% (avec recyclage du Pu)

Conséquences :

- pour produire 400 TWh/an il faudra 750 tonnes d'U au lieu de 1150
- réduction de 35% des déchets de structure (gainage)

Utilisation du MOX : jusqu'à 50% (au lieu de 33%)
l'utilisation de 100% de MOX est à l'étude

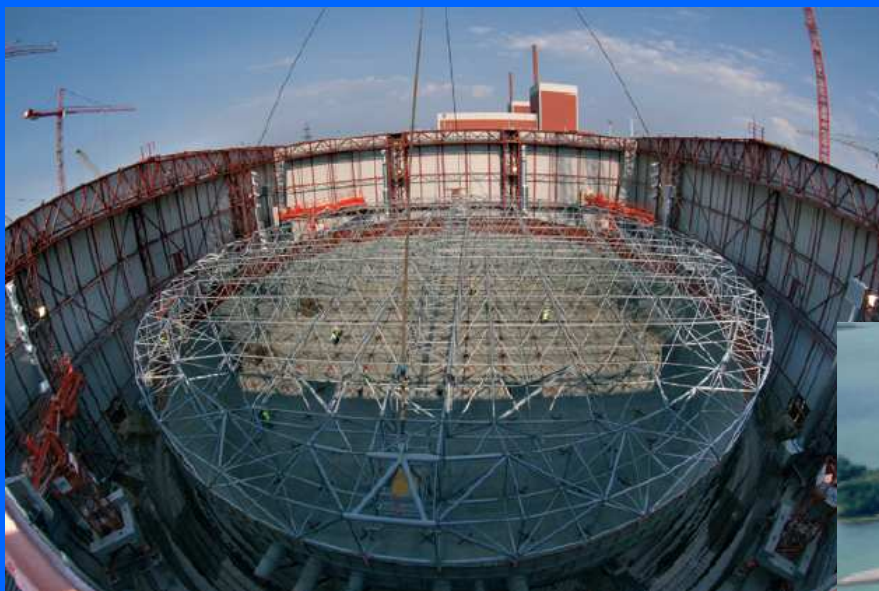
Rendement global : 36% au lieu de 34%

réduction des déchets : PF : - 6% (- 20% avec recyclage du Pu)
actinides : -15% (- 33% avec recyclage du Pu)

Etude comparative
du coût de l'EPR
par rapport à un CCG

Euros/MWh	EPR	1600 MWe Finlande	CCG	CCG Finlande
Investissement	17,1	19,9	5,6	7,0
Exploitation	4,8	7,2	3,1	1,5
Combustible	4,2	3,0	25,2	23,7
R et D	0,6			
Total	27,7	30,1	33,9	32,2

EPR en construction 2 : Olkiluoto (Finlande), Flamanville (France)
EPR en commande : 6 (2 Chine, 4 USA)
EPR envisagés : Finlande, Grande Bretagne...

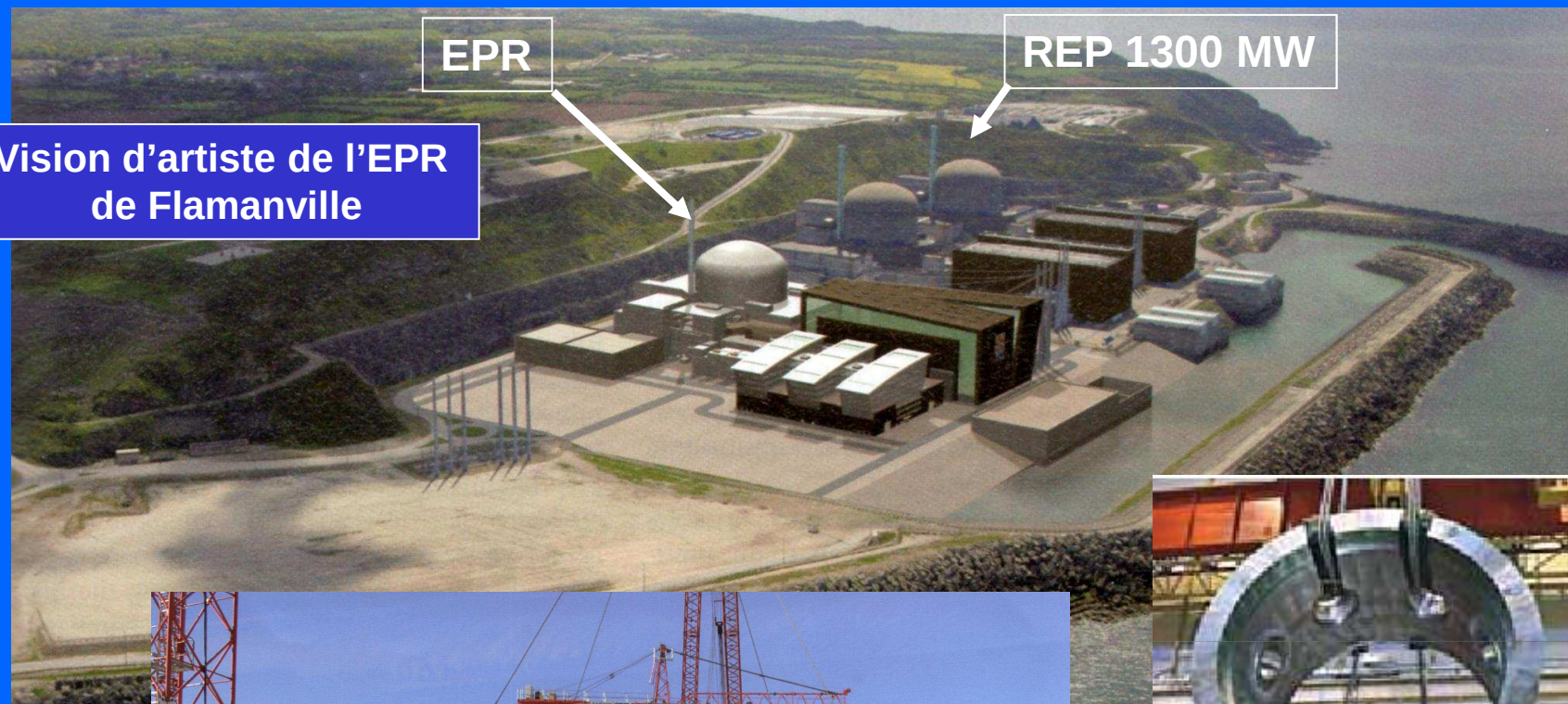


**Chantier de construction
du 1er EPR**

Olkiluoto (Finlande)



Vue d'artiste de la centrale terminée



EPR

REP 1300 MW

Vision d'artiste de l'EPR
de Flamanville

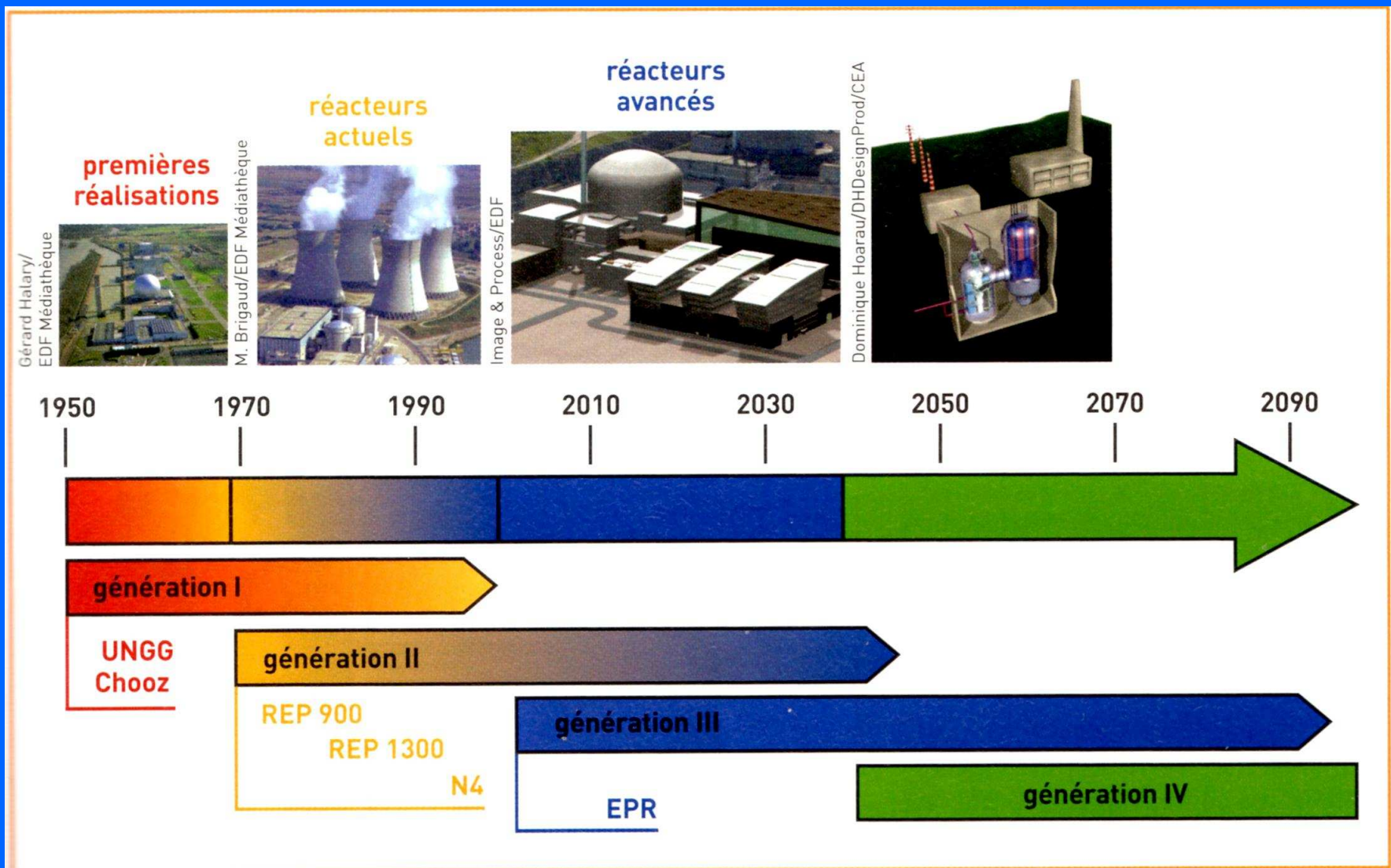


Vue actuelle du chantier
de l'EPR



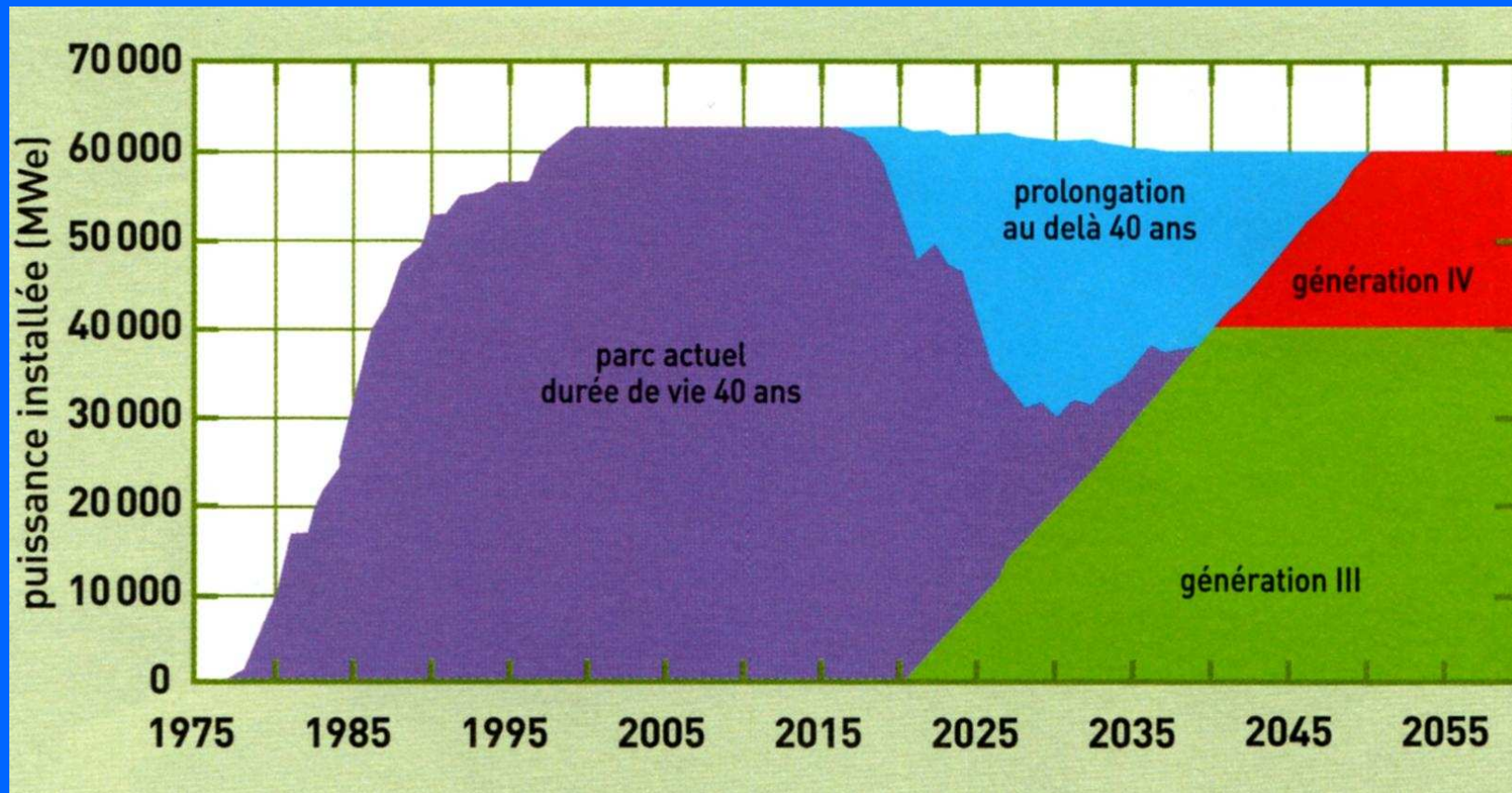
Virole porte-tubulure de la cuve destinée au
réacteur Flamanville 3 d'EDF, le premier EPR
devant être construit sur le sol français.

Les générations de réacteurs nucléaires



Générations des réacteurs nucléaires en France

L'avenir du nucléaire : Les réacteurs nucléaires de génération IV



Génération 4 : appelée à prendre la relève à partir de 2030 :

- les derniers réacteurs de la génération 2 (palier N4)s'arrêteront en 2050
- mise en service progressive de la génération 3 (EPR) à partir de 2020

En 2001, 10 pays se sont associés pour étudier différentes filières de nouveaux réacteurs nucléaires



+ Russie, Chine (2007)

6 filières ont été retenues :

- VHTR (Very high temperature reactor system) - Réacteur à très haute température (1000°C/1200°C) refroidi à l'hélium, dédié à la production d'hydrogène ou à la co-génération hydrogène/électricité ;
- GFR (Gas-cooled fast reactor system) - Réacteur rapide à caloporteur hélium ;
- SFR (Sodium-cooled fast reactor system) - Réacteur rapide à caloporteur sodium ;
- LFR (Lead-cooled fast reactor system) - Réacteur rapide à caloporteur alliage de plomb ;
- SCWR (Supercritical water-cooled reactor system) - Réacteur à eau supercritique ;
- MSR (Molten salt reactor system) - Réacteur à sels fondus.

Sur les 6 projets :

- 4 sont des réacteurs à neutrons rapides (surgénérateurs)
SFR (Na), GFR (gaz), LFR (Pb), SCWR (supercritique)
- 2 sont à usages particuliers :
VHTR , MSR (sels fondus)

Choix des pays participants

- Le réacteur rapide à sodium (France, Japon, USA, Royaume Uni, Corée, UE)
- Le réacteur rapide à gaz (850°) (France, Japon, USA, Royaume Uni Corée, Suisse, Afrique du Sud)
- Le réacteur à gaz très haute température (1000°) (France, Japon, USA, Royaume Uni, Corée, Suisse, Afrique du Sud)
- Le réacteur à sel fondu (800°) (USA, UE, France)
- Le réacteur à eau supercritique (>375°) (France, Japon, USA, Royaume Uni, Corée, Suisse, Canada)
- Le réacteur rapide au plomb (USA, Japon, Suisse, Corée)

La France est impliquée dans 5 filières sur 6 mais privilégie les réacteurs rapides à Na, le réacteur à gaz à très haute température et le réacteur rapide à gaz.

I – Les réacteurs à neutrons rapides

Intérêts des Réacteurs à neutrons rapides (RNR)

Réserves d'uranium : 16 à 23 Mt
Consommation actuelle : 60 000 t/an
soit une disponibilité de 400 ans

Si l'usage du nucléaire devait augmenter... risque de pénurie

Solution : les RNR

$U^{238} \Rightarrow Pu^{239}$ fissile

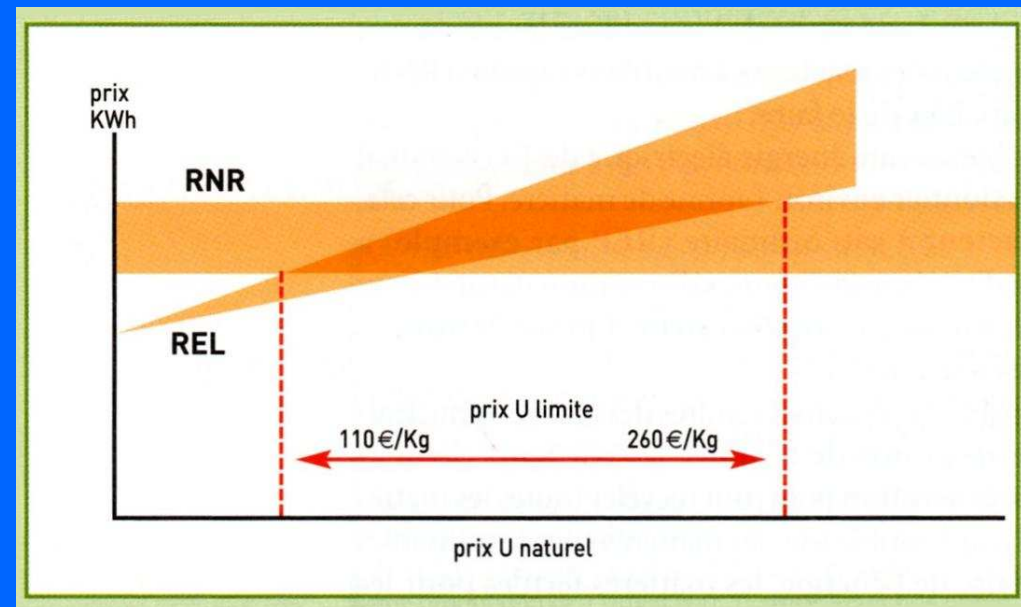
investissement >20%

*La rentabilité dépend du
prix de l'uranium*

Utilisation du stock d'U appauvri

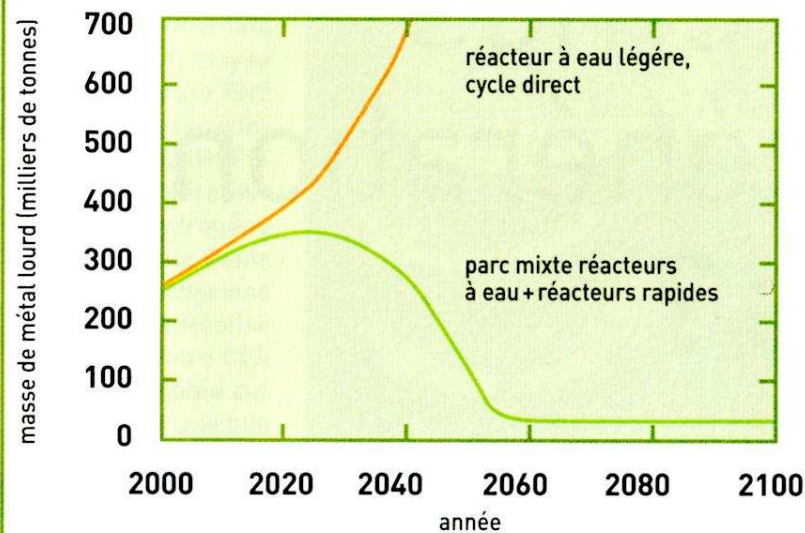
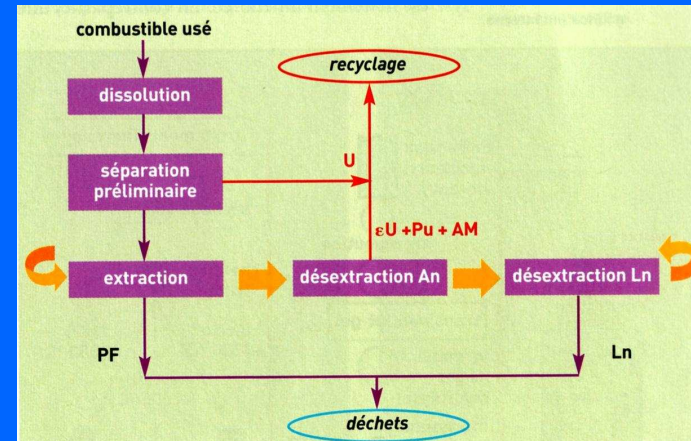
1kg U enrichi 4% = 5 kg d'U appauvri

Le stock actuel d'U appauvri = 7000 ans de fonctionnement d'un RNR

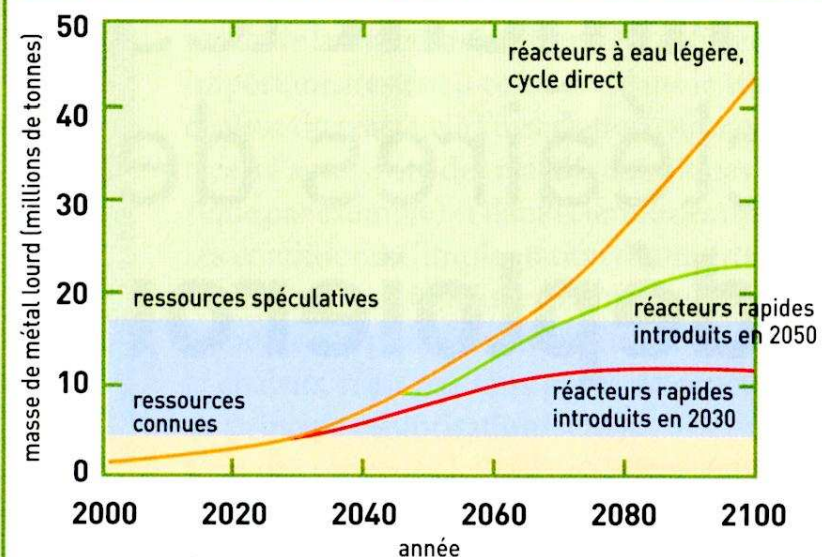


Autre avantages : incinération des déchets radioactifs actinides

Les actinides sont séparés des PF et réintroduit dans le combustible (procédé GANEX du CEA)

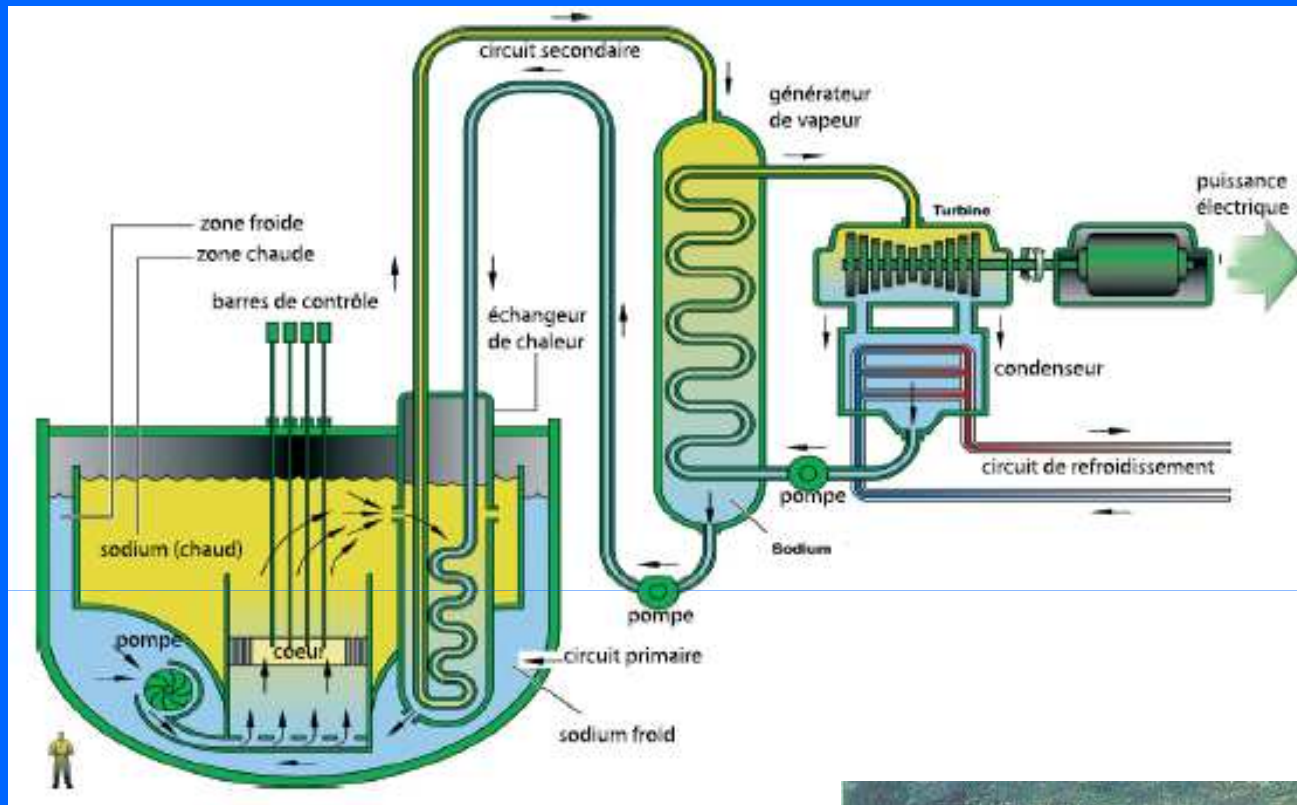


Évolution du stock mondial d'actinides en fonction du parc nucléaire, REL ou RNR



Évolution des besoins mondiaux en uranium en fonction du parc nucléaire, REL ou RNR⁶¹

1 – Les RNR refroidis au Na (SFR ou RNR-Na)



**SuperPhenix
(Crest – Malville)**

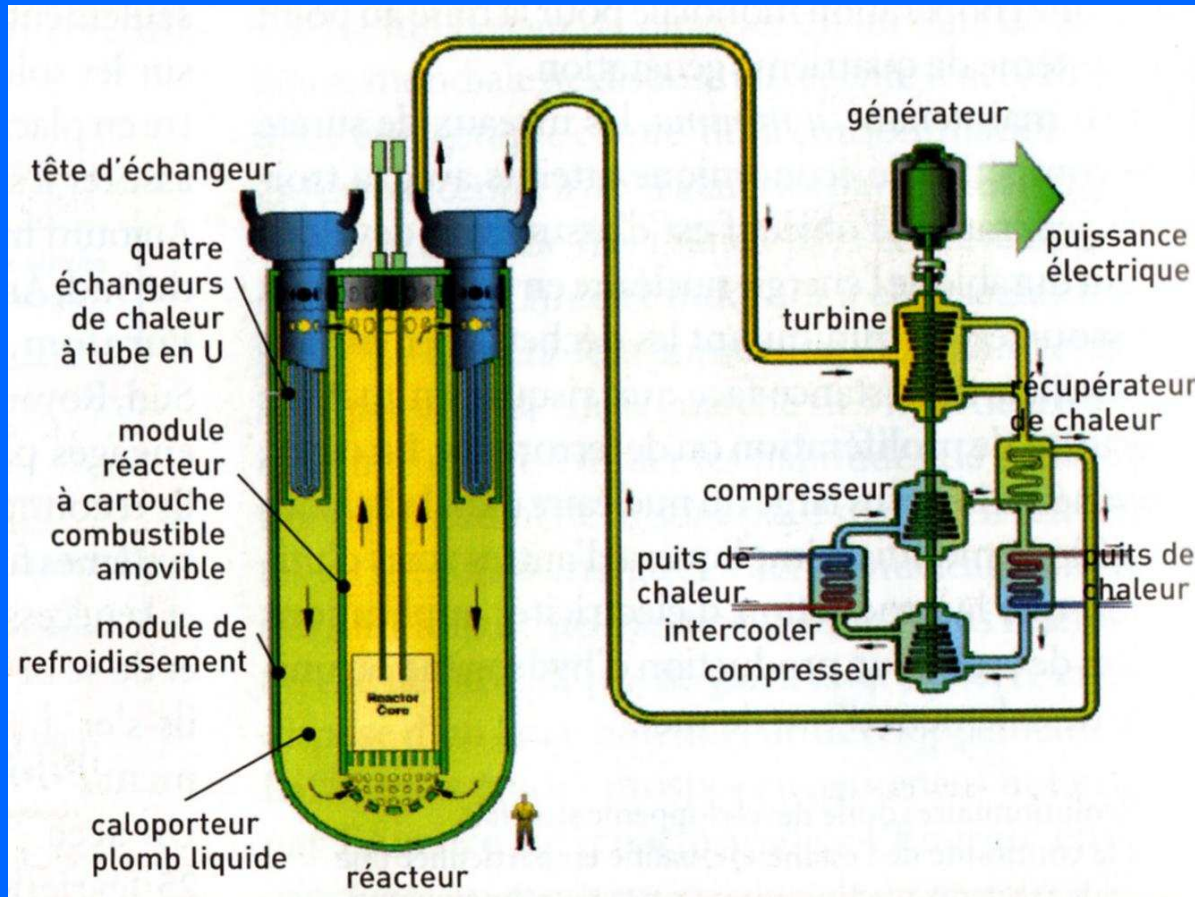
- avec retraitement métallique :
de 150 – 500 MWe
- avec retraitement chimique (PUREX)
500 à 1200 MWe



RNR 1200 MW

Arrêté en 1998

2 – Les RNR refroidis au Pb (LFR ou RNR-Pb)



Plusieurs concepts :

« battery » : 50-100 MW

« modulaire » : 300-400 MW

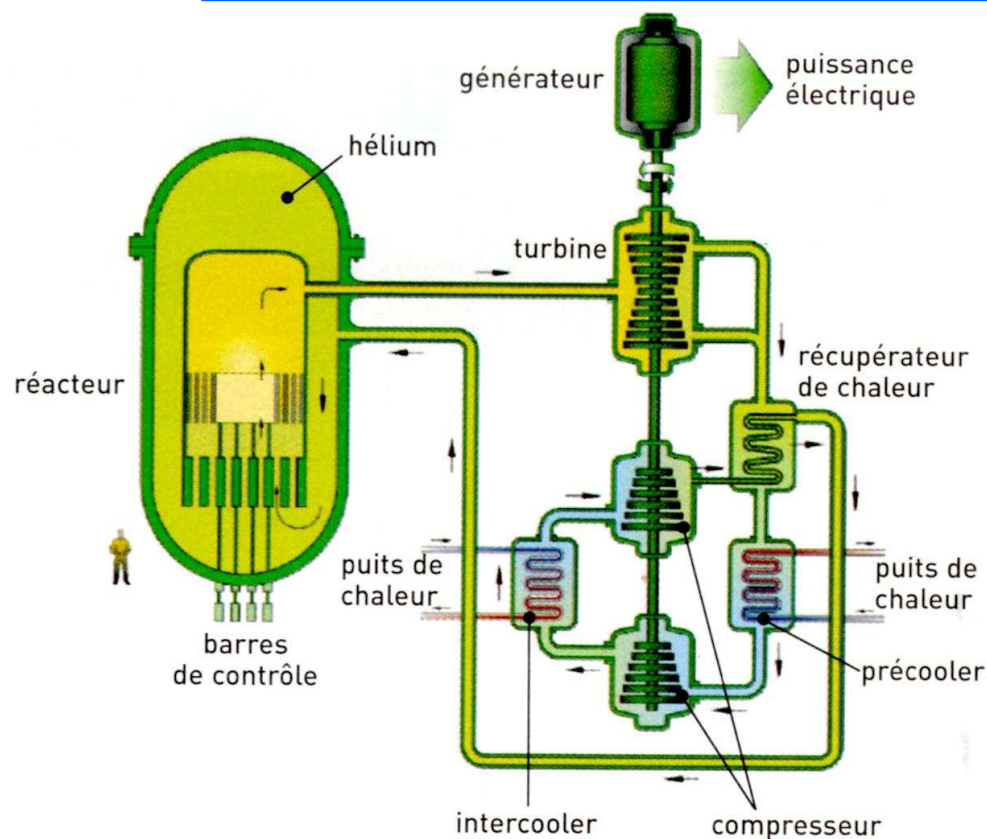
« Puissant » : 1200 MW

fluide caloporteur : Pb ou Pb-Bi

cycle fermé avec recyclage complet des actinides

problème : risque de corrosion par les métaux liquides

3 – Les réacteurs à haute température à gaz (GFR ou RNR-G)



refroidis à He sous pression

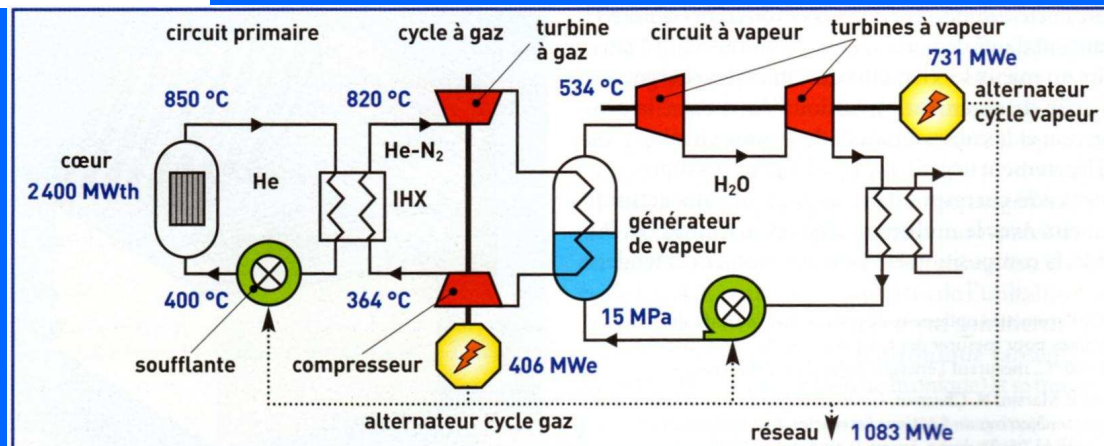
600 à 2400 MW_{th}

(300 à 1200 MWe)

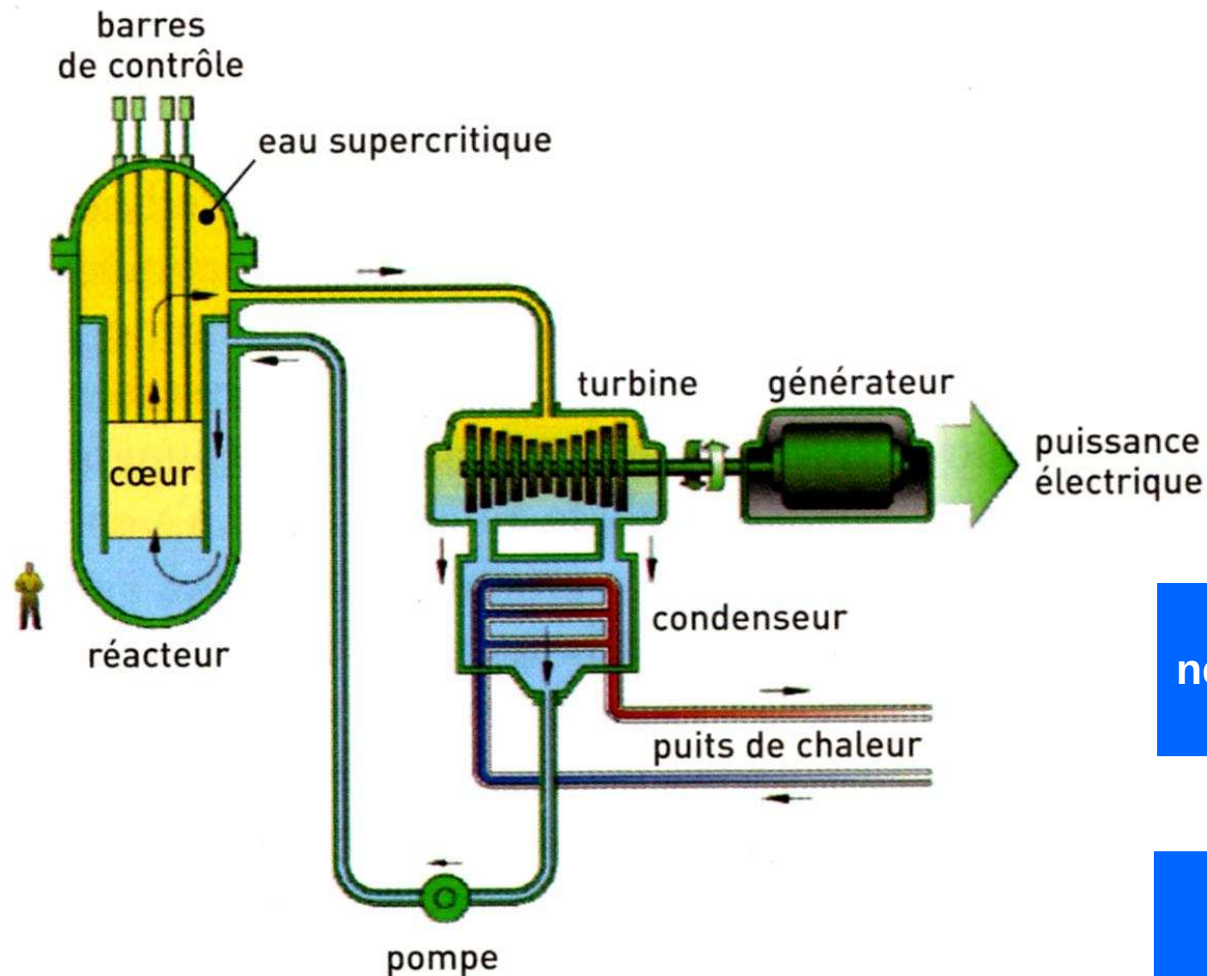
rendement élevé :48%

recyclage du combustible sur place

Conversion d'énergie
intégrant un cycle
combiné



4 – Les réacteurs à eau supercritique (SCWR ou RESC)



refroidi à l'eau
supercritique
25 MPa soit 260 bars
550°C

rendement : 44%

1700 MWe

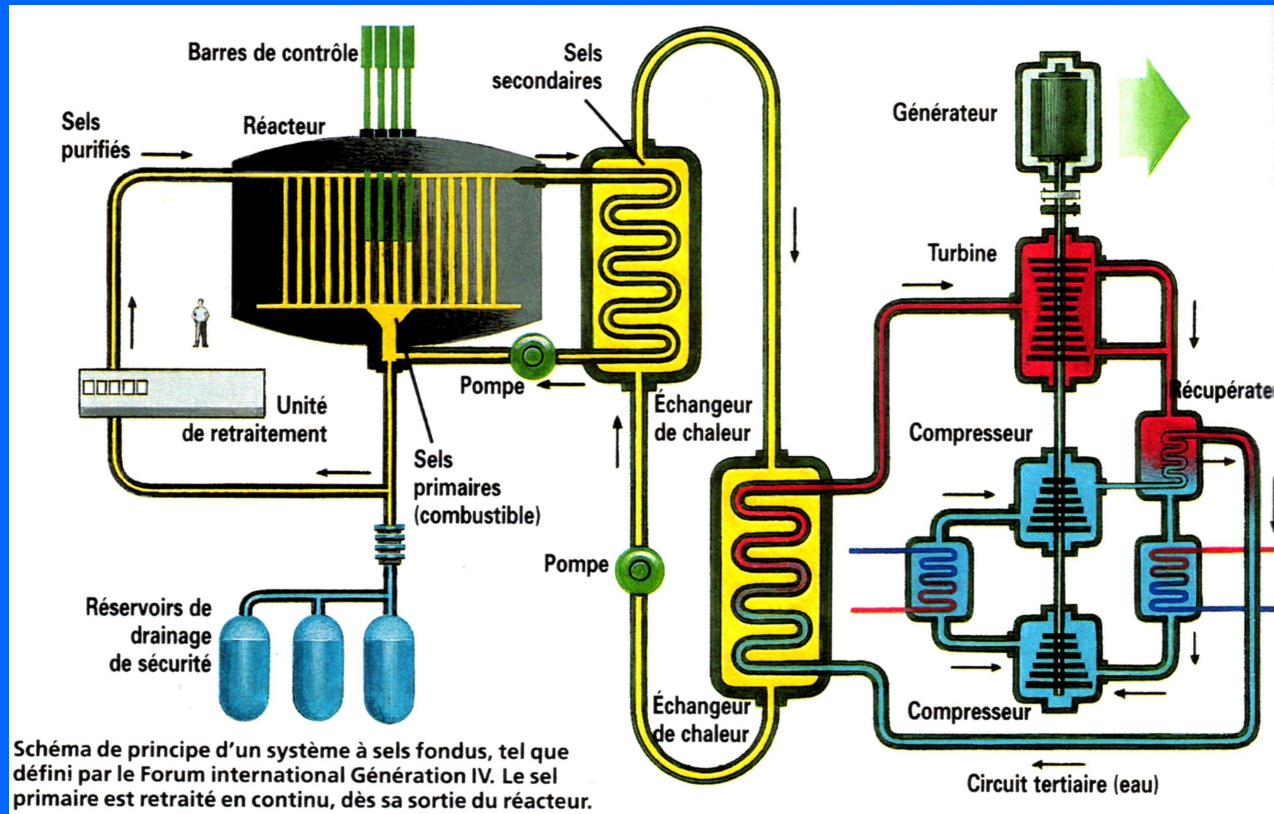
1ère étape :
neutrons thermiques avec
cycle ouvert

2ème étape :
neutrons rapides avec
cycle fermé pour recyclage
des actinides

Cycle ouvert : on ne recycle pas
Cycle fermé: on recycle

II – Les autres filières de réacteurs

1 – Les réacteurs à sels fondus (MSR ou RSF)



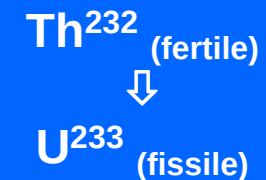
Cœur liquide et cycle fermé par traitement pyrochimique

Combustible :
fluorure de Zr, Na, actinides)

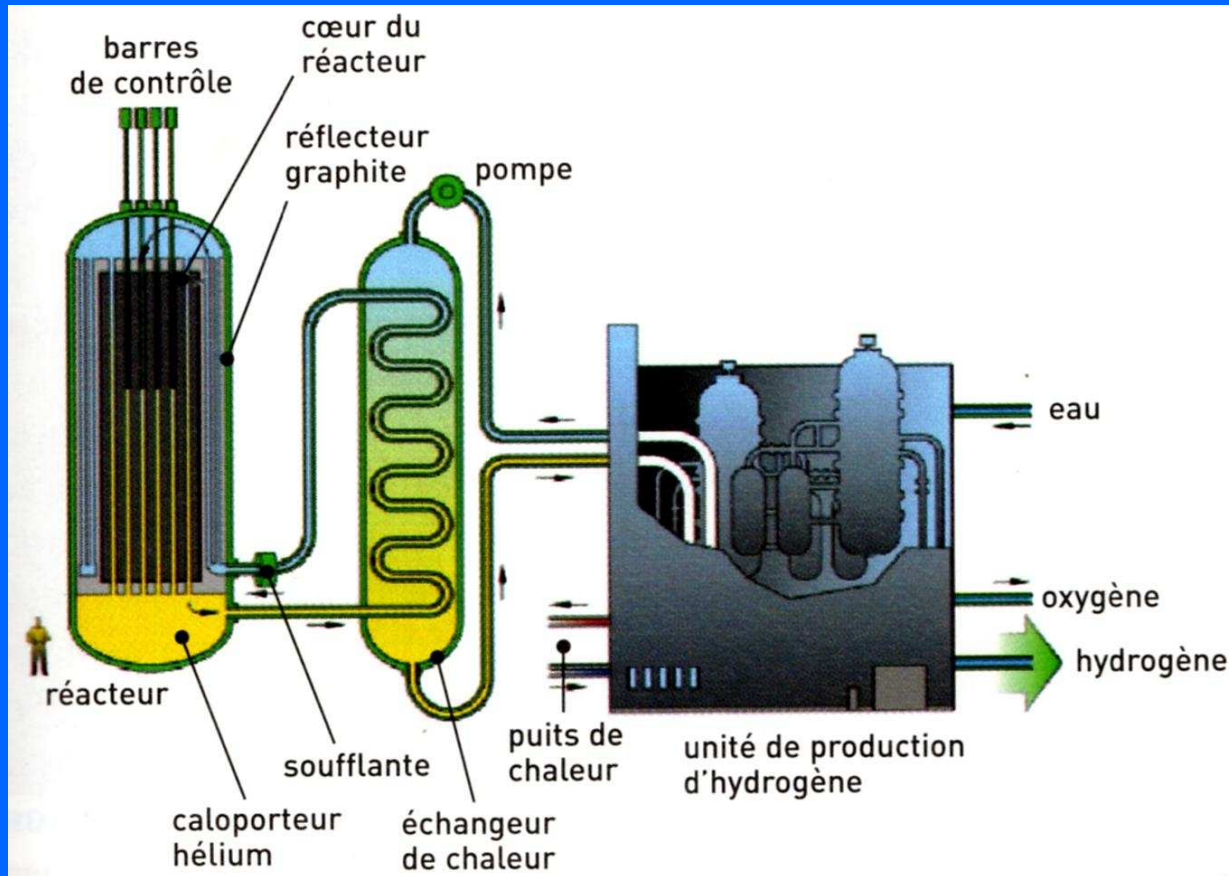
neutrons
épi-thermiques

1000 MWe

Ce type de réacteur
peut être utilisé pour
l'emploi du Th :



2 – Les réacteurs à très hautes températures VHTR ou RTHT



neutrons thermiques

He sous pression

600 MW_{th}

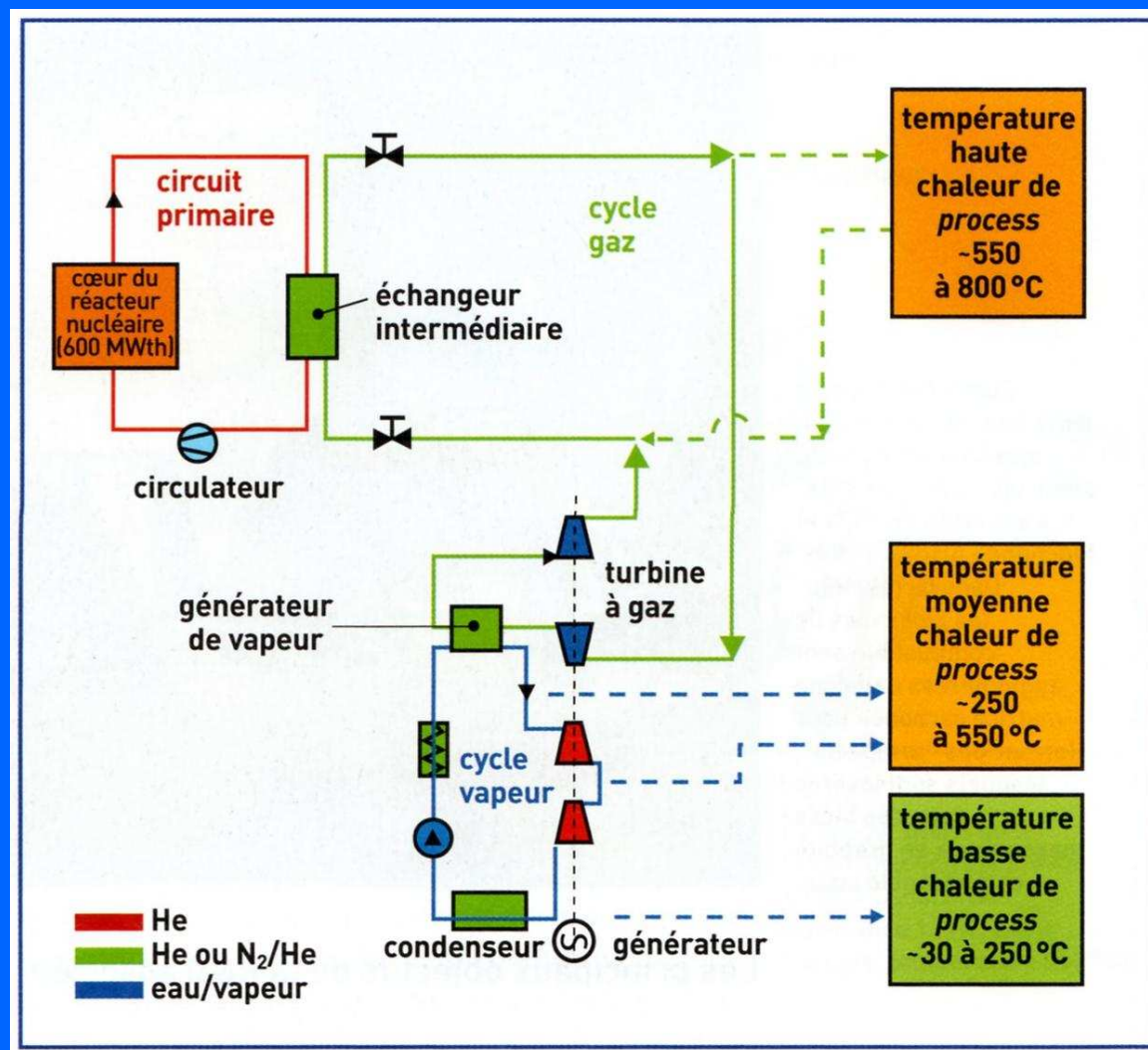
température :
900 à 1100°C

Cycle ouvert

Son but : fournir une source de chaleur élevée et bon marché

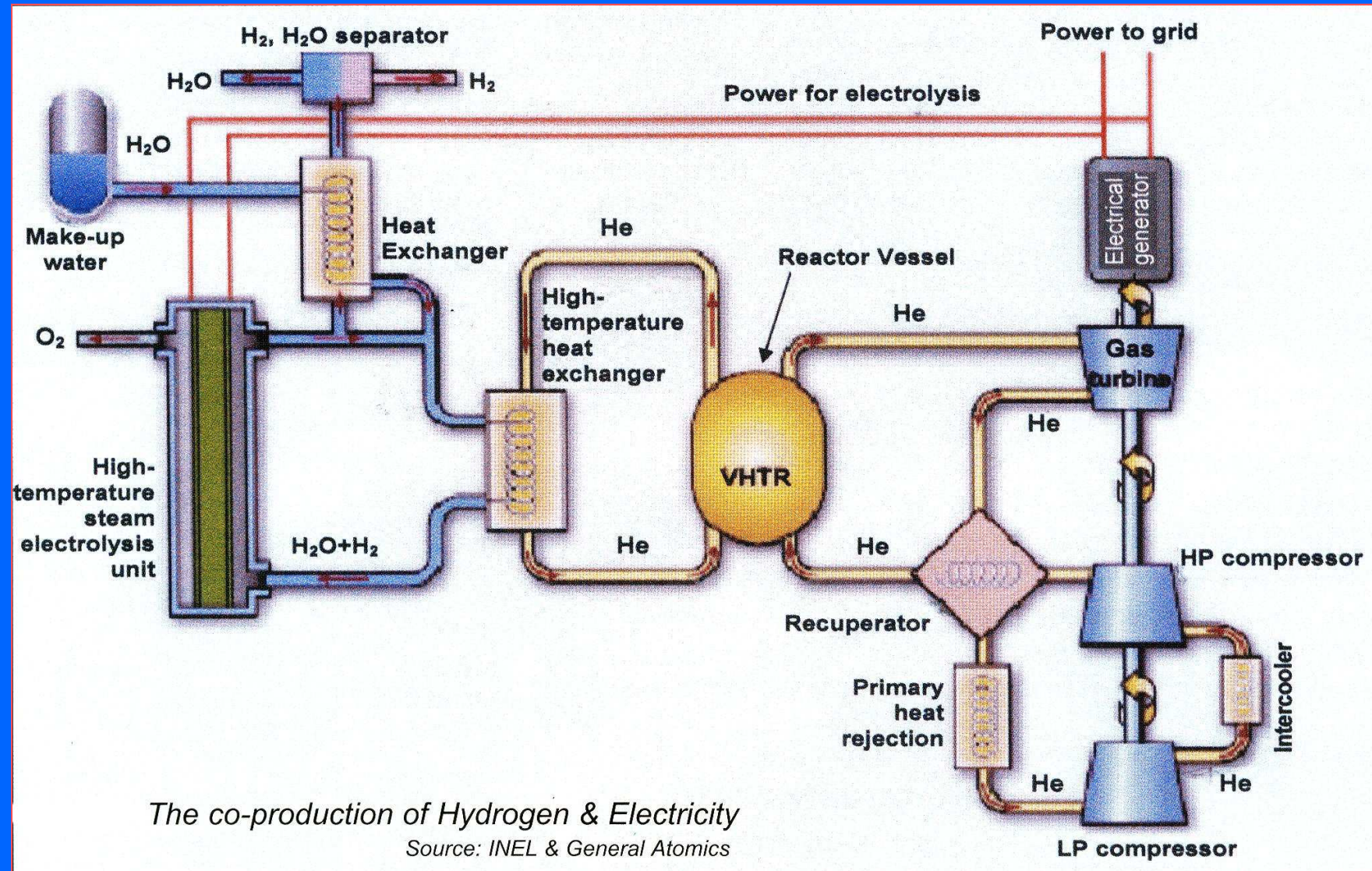
- production d'hydrogène
- dessalement de l'eau de mer...

Projet ANTARES d'AREVA



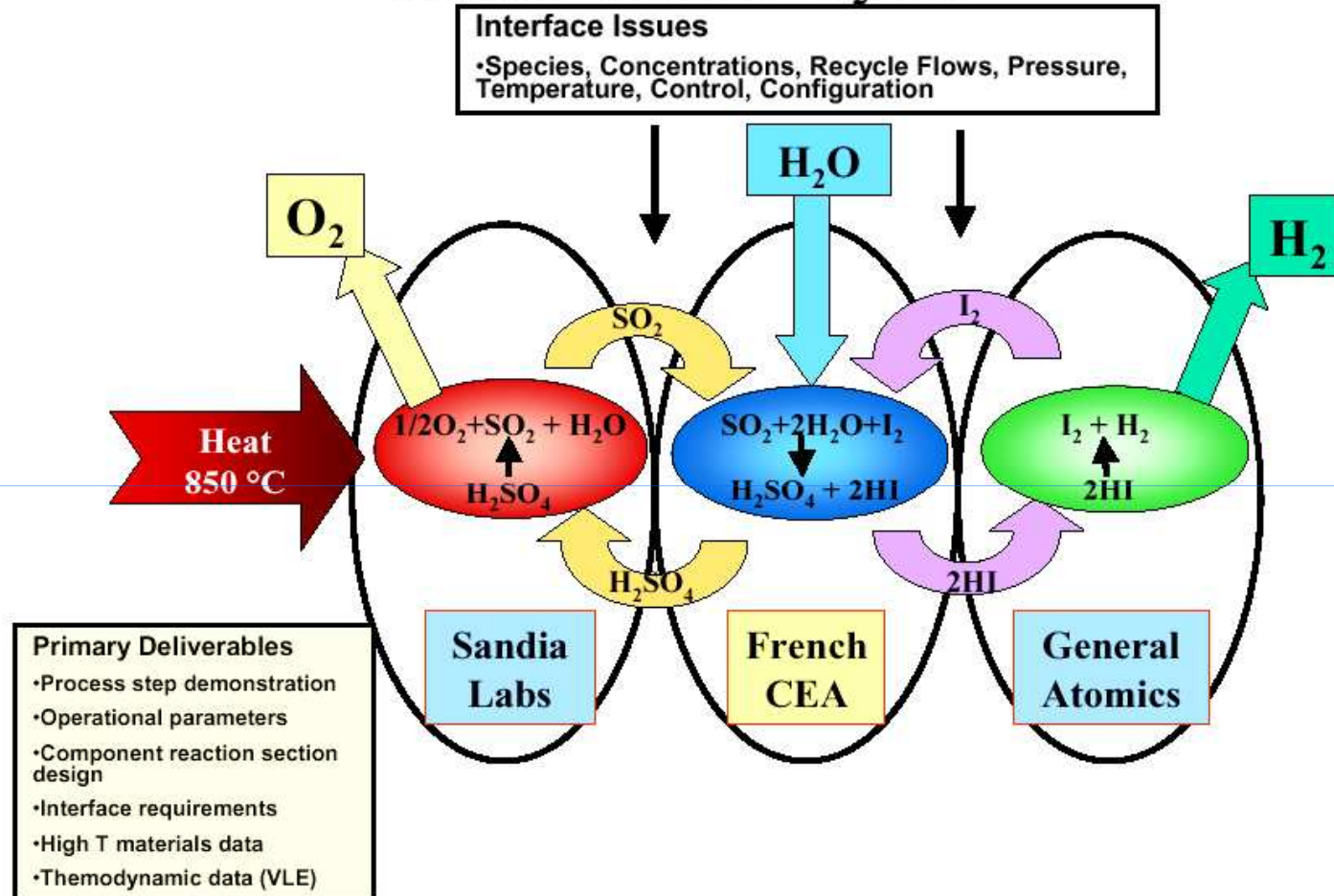
Utilisation des différentes zone de chaleur pour la production d'hydrogène, le dessalement d'eau de mer, la gazéification du charbon, le traitement des sables bitumineux, des huiles lourdes et de la biomasse.

Production d'hydrogène



Projet de réacteur nucléaire HTR (900°C – He sous pression)
 avec production d'hydrogène par électrolyse à haute température

INERI Demonstration of the Sulfur–Iodine Cycle



Production d'hydrogène par décomposition thermique de l'eau dans le cadre du cycle soufre-iode

V - La propulsion nucléaire

A l'heure actuelle exclusivement navale

- militaire : sous-marins, porte-avions



- marine marchande

SNA : sous-marin nucléaire d'attaque
SNLE : sous-marin nucléaire lanceur d'engins
PAN : Porte avions nucléaire

quelques essais peu concluants dans les années 60
(coût d'exploitation trop coûteux à l'époque)

Le Savannah (USA)(1962)

Le Otto Hahn (All.)(1968)

Le Mutsu (Japon)(1972)

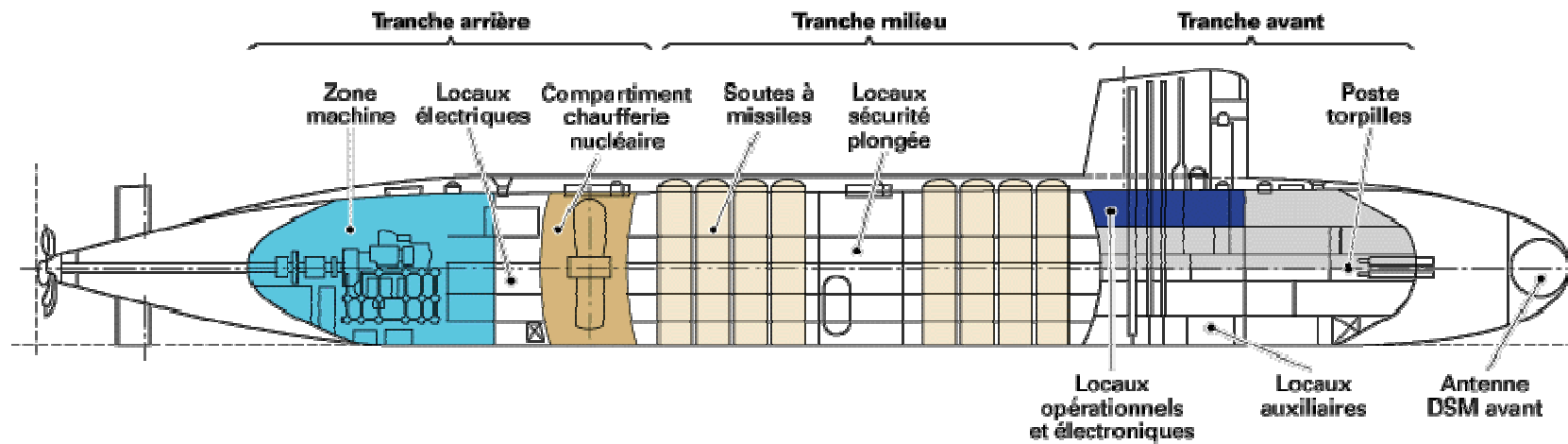
-un succès : les brises-glace russes
7 navires en service (1959 à 1989)

Tableau 4 – Perspectives à l'horizon 2020

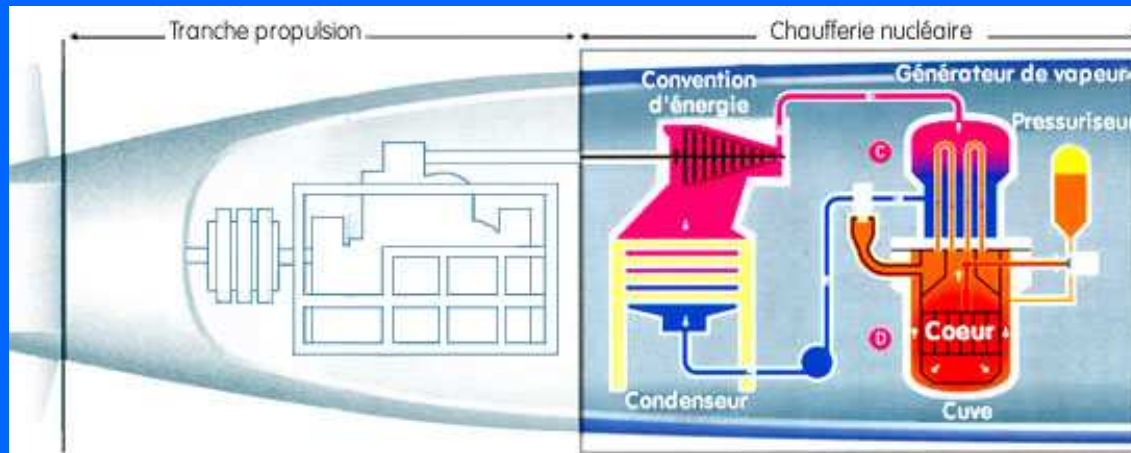
Pays	SNLE	SNA	PAN	Brise-glace	Autres navires
États-Unis.....	20	40	9		1 ou 2
Russie.....	25	40	1 ou 2	7	5
Chine.....	4	8			
Royaume-Uni....	4 (?)	10			
France.....	4	6	1 ou 2		

(1) SNLE, SNA, PAN : voir tableau 2

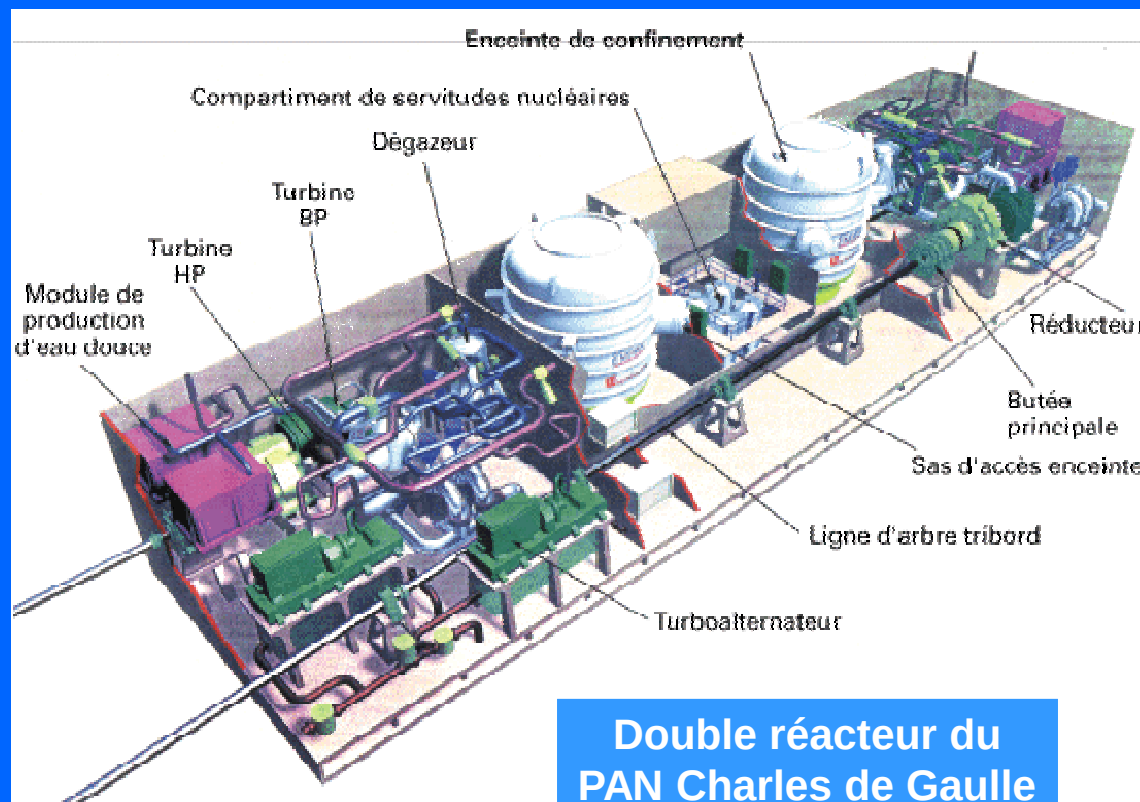
SNLE : sous marin lanceur d'engin
SNA : sous marin d'attaque
PAN : Porte avion nucléaire



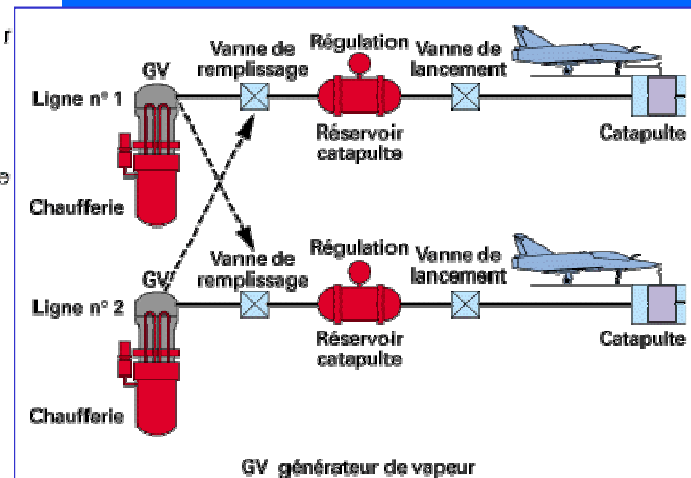
Coupe d'un sous-marin nucléaire de type SNLE



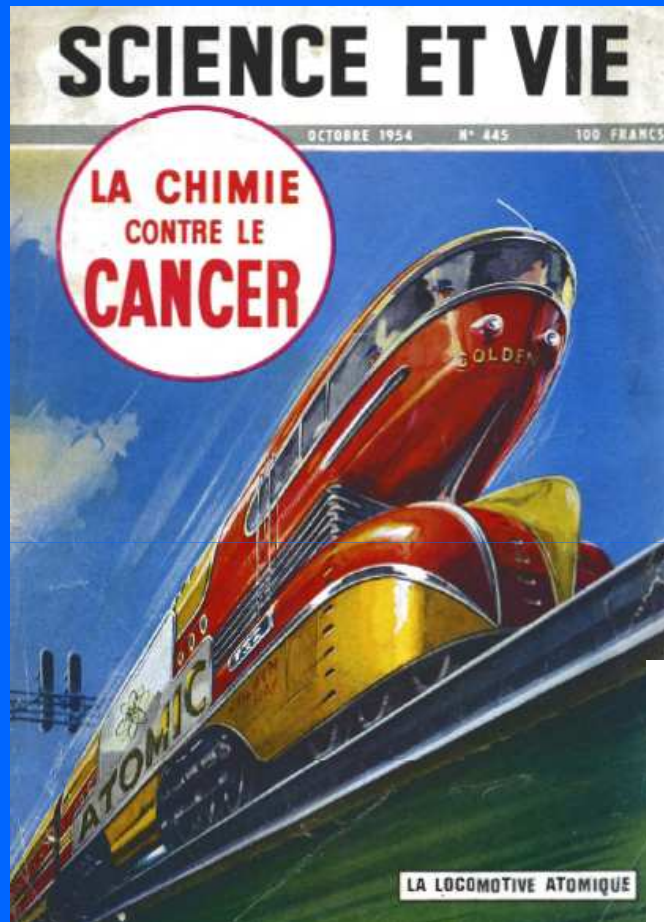
Chaudière compacte de type REP (SNLE)



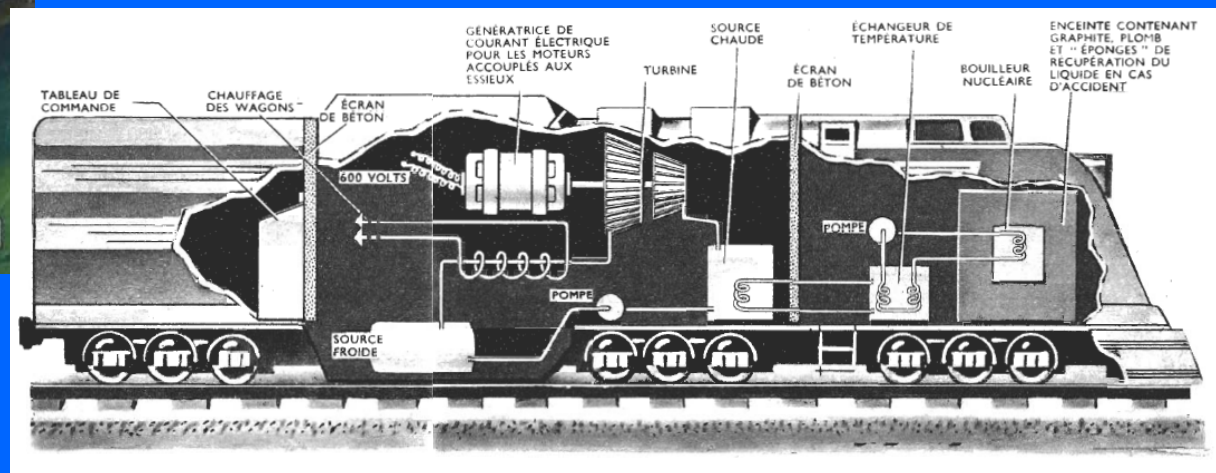
Double réacteur du
PAN Charles de Gaulle



Des projets étonnants ! (mais rapidement abandonnés)



1954 : projet américain d'une locomotive à propulsion nucléaire...



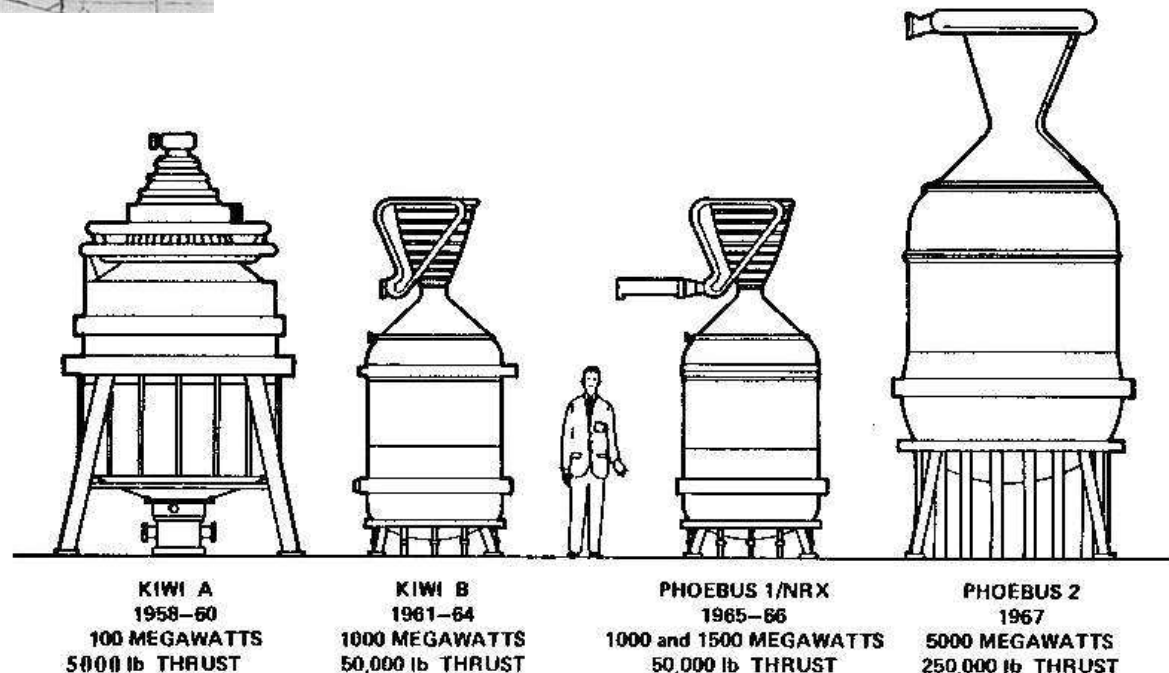
La propulsion aéronautique et spatiale nucléaire

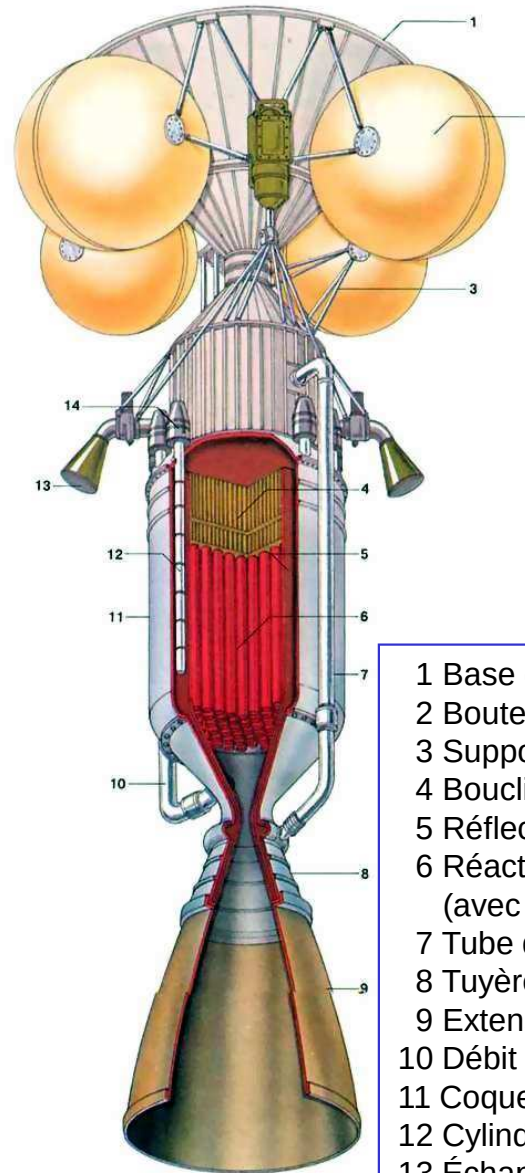


Projet US (abandonné) de bombardier nucléaire YB60 (1960)

*Les turboréacteurs fonctionnaient avec de l'air chauffé
par un réacteur nucléaire
Le poids des protections anti-radiation s'est révélé trop
important...*

Projet KIWI de moteur fusée nucléaire (1955-1972)

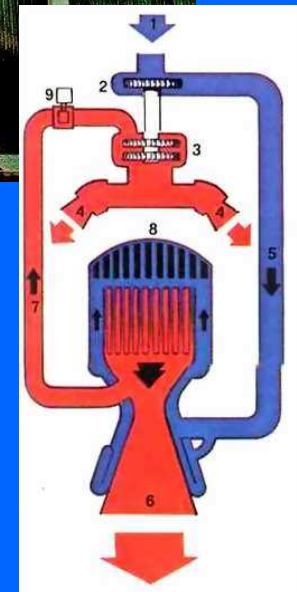


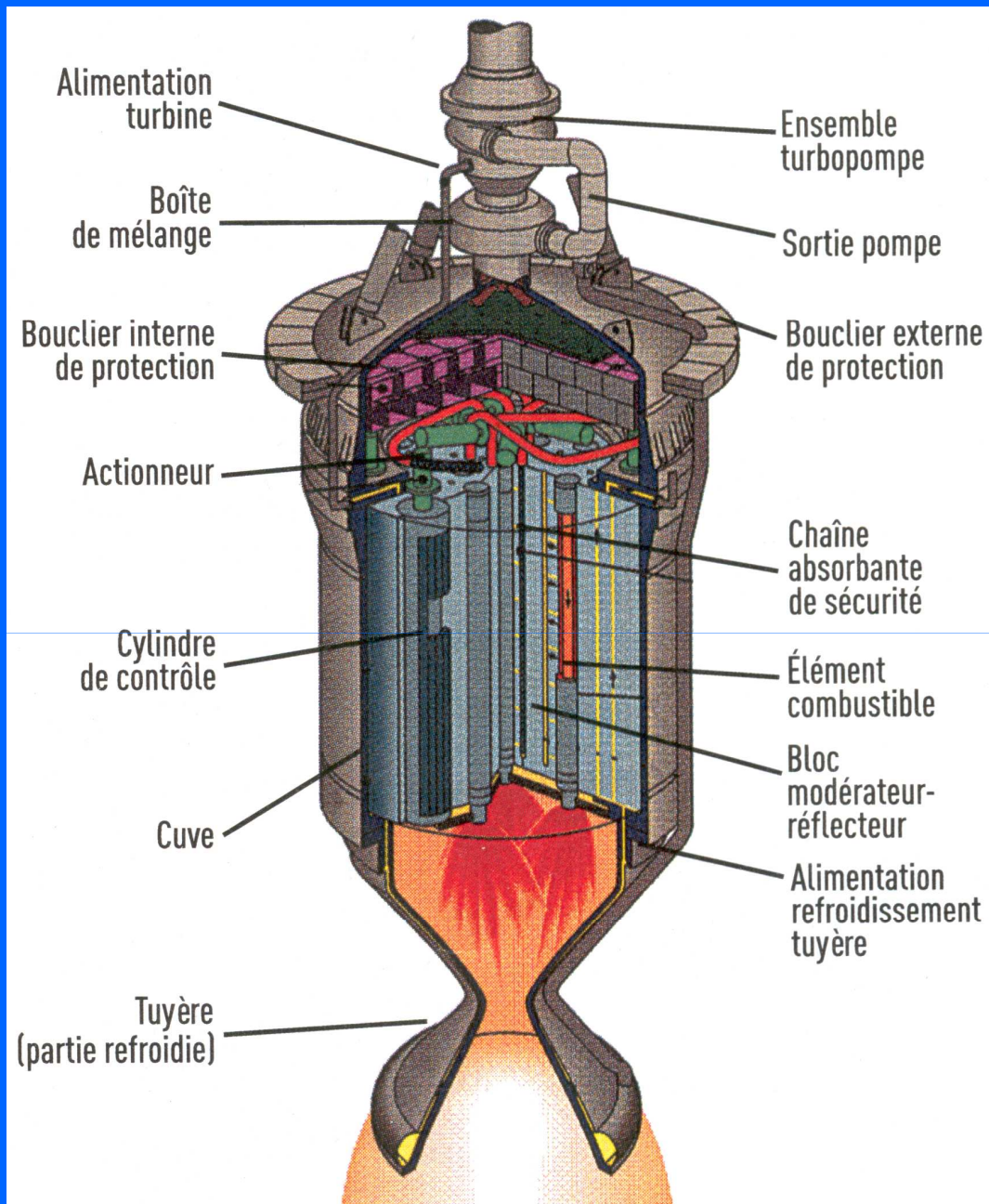


Projet NERVA (1972)
 90t de poussée
 5000 MW
 vitesse d'éjection 8 km/s
 impulsion spécifique : >1000 s

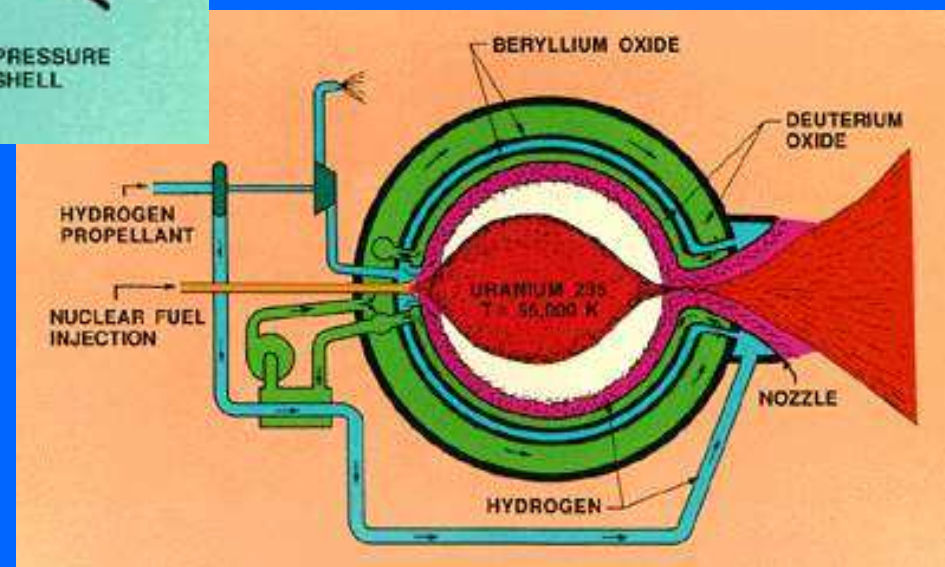
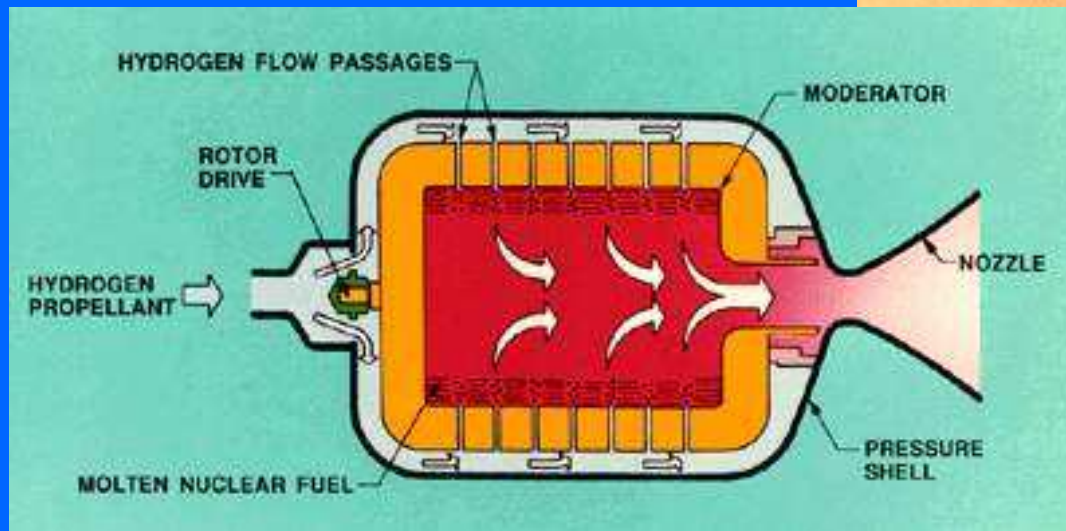
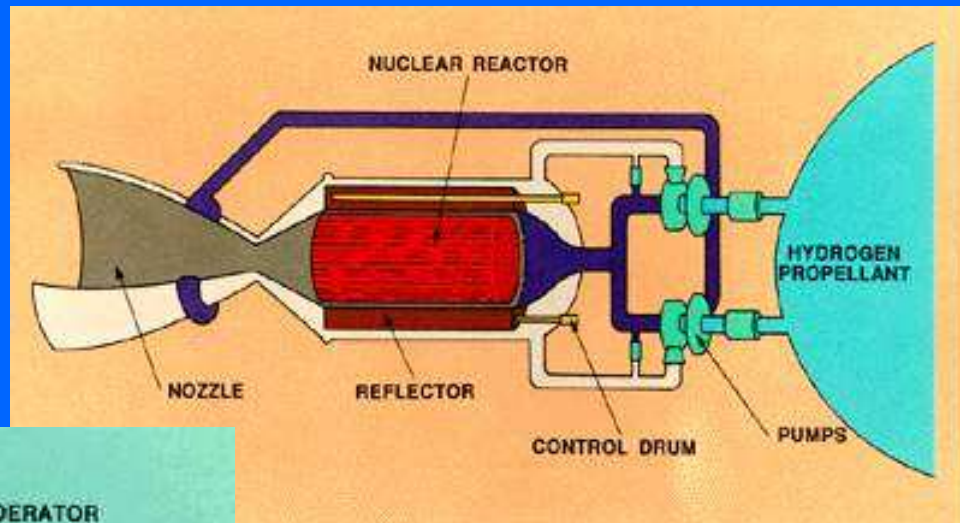
**Nuclear Engin for Rocket
 Vehicle Application**

- 1 Base du réservoir d'hydrogène liquide
- 2 Bouteilles sphériques de pressurisation
- 3 Supports structurels.
- 4 Bouclier anti-radiations
- 5 Réflecteur entourant le noyau du réacteur
- 6 Réacteur nucléaire modéré au carbone
 (avec des conduits à travers lesquels le LH2 gicle à haute pression)
- 7 Tube de refroidissement de la tuyère
- 8 Tuyère
- 9 Extension de la tuyère
- 10 Débit du réacteur vers la turbine
- 11 Coque de pression
- 12 Cylindre de contrôle
- 13 Échappement de la turbine (pour le contrôle d'attitude
 et l'augmentation de la poussée)
- 14 Anneaux des commandes du cylindre de contrôle





Divers projets de réacteurs spatiaux (type nucléothermique)



Autre mode de propulsion nucléaire

propulsion nucléaire électrique « nucléoélectrique »)

énergie nucléaire → énergie électrique → ionisation d'un gaz → accélération

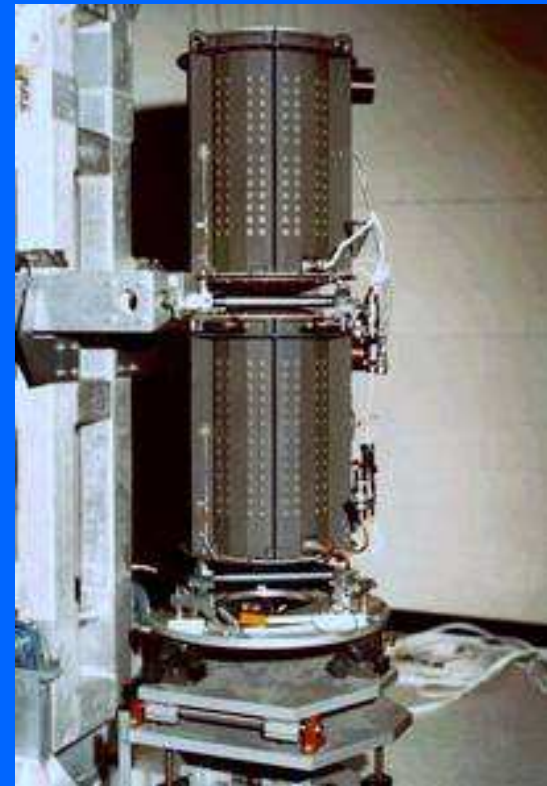
- très longue impulsion spécifique (plusieurs mois)
- très faible poussée...

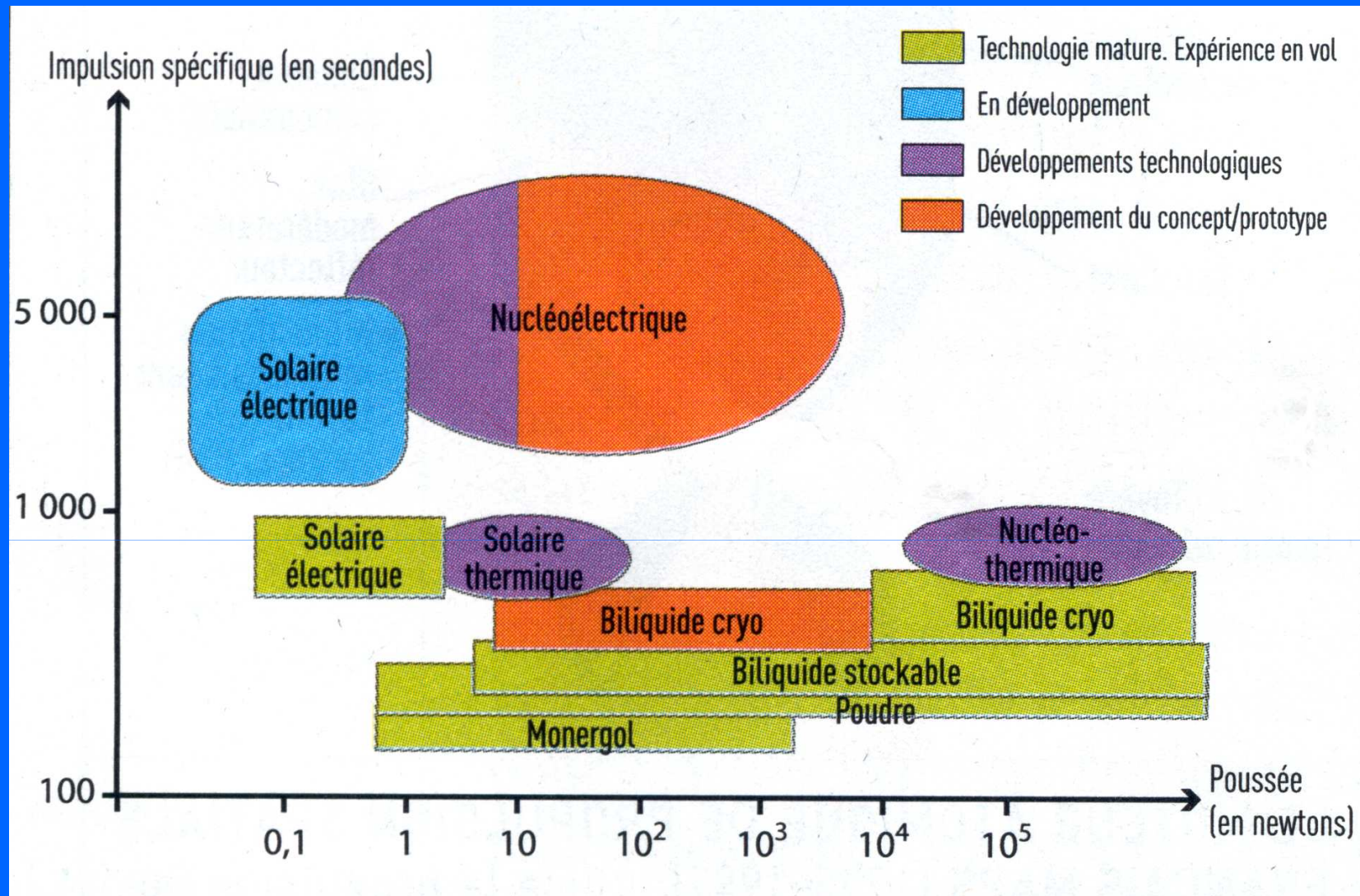
Autre application :

générateurs radio-isotopiques (Pu238)

pour missions de très longue durée

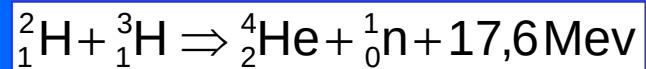
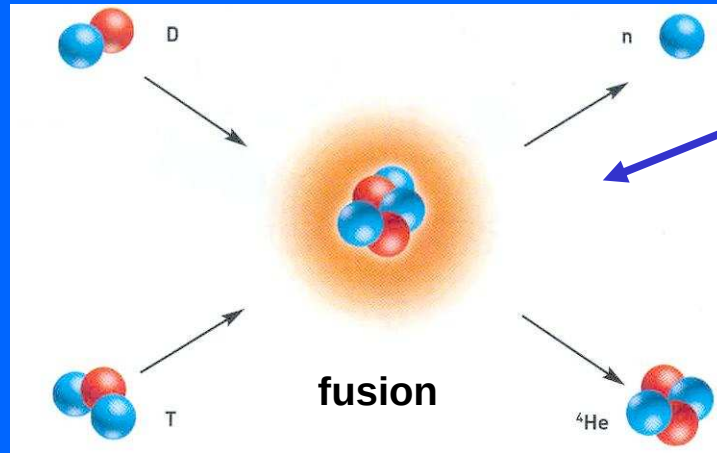
RTG





Performances comparées des différentes techniques utilisables en astronautique

VI – La fusion thermonucléaire

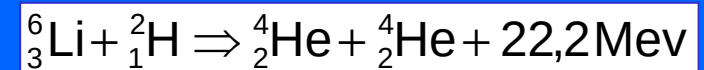
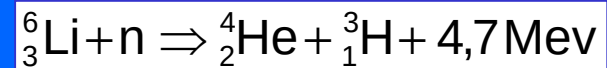
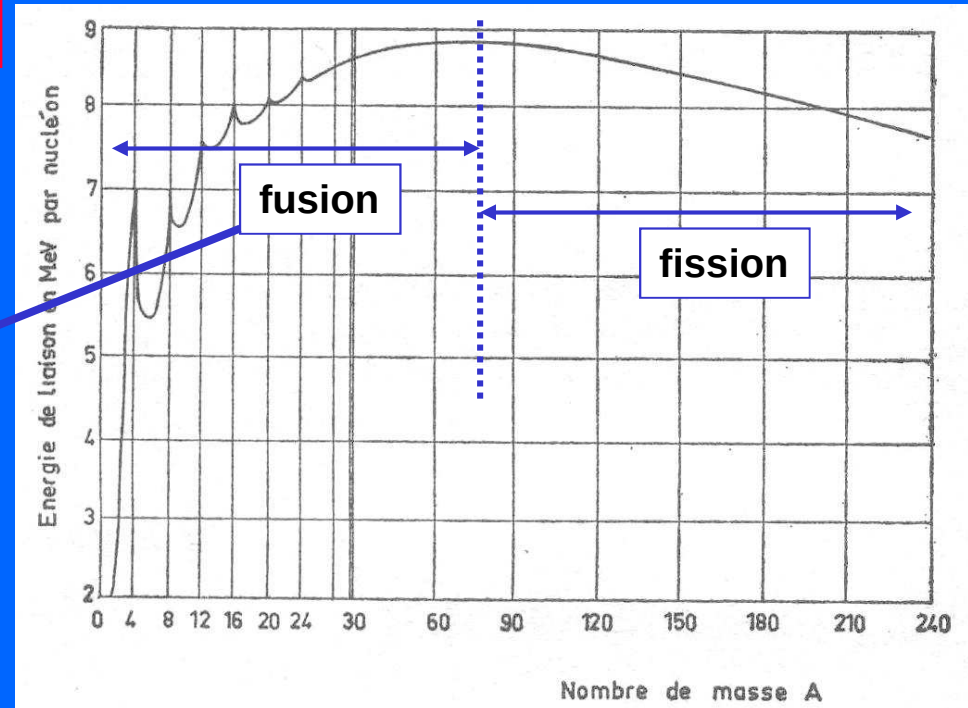


Problème :
vaincre la barrière de potentiel (0,15MeV)

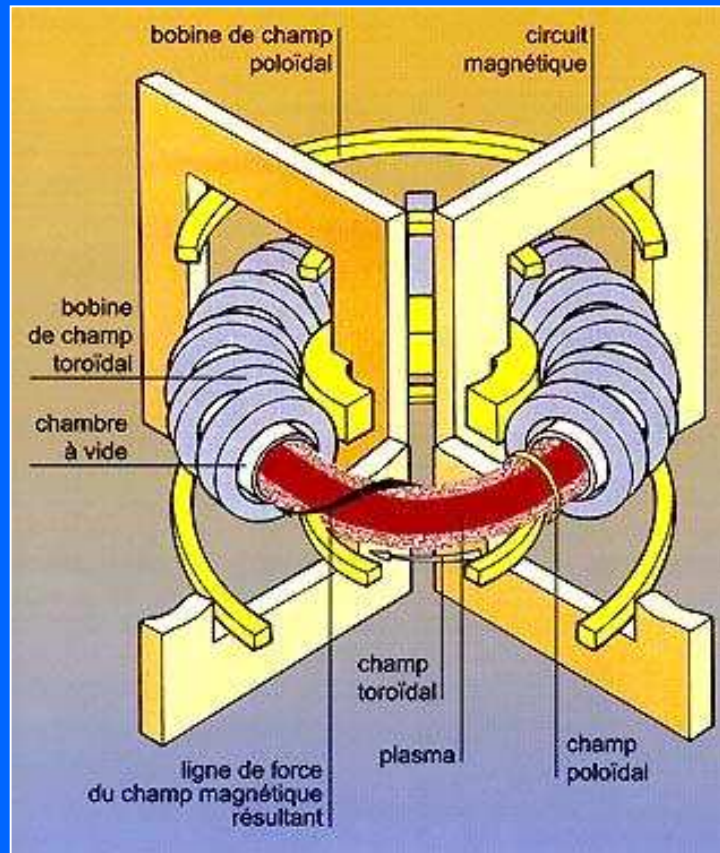
➡ température élevée (10^7 à 10^9 K)

2 méthodes :

- confinement d'un plasma par champ magnétique
- confinement inertiel (laser)



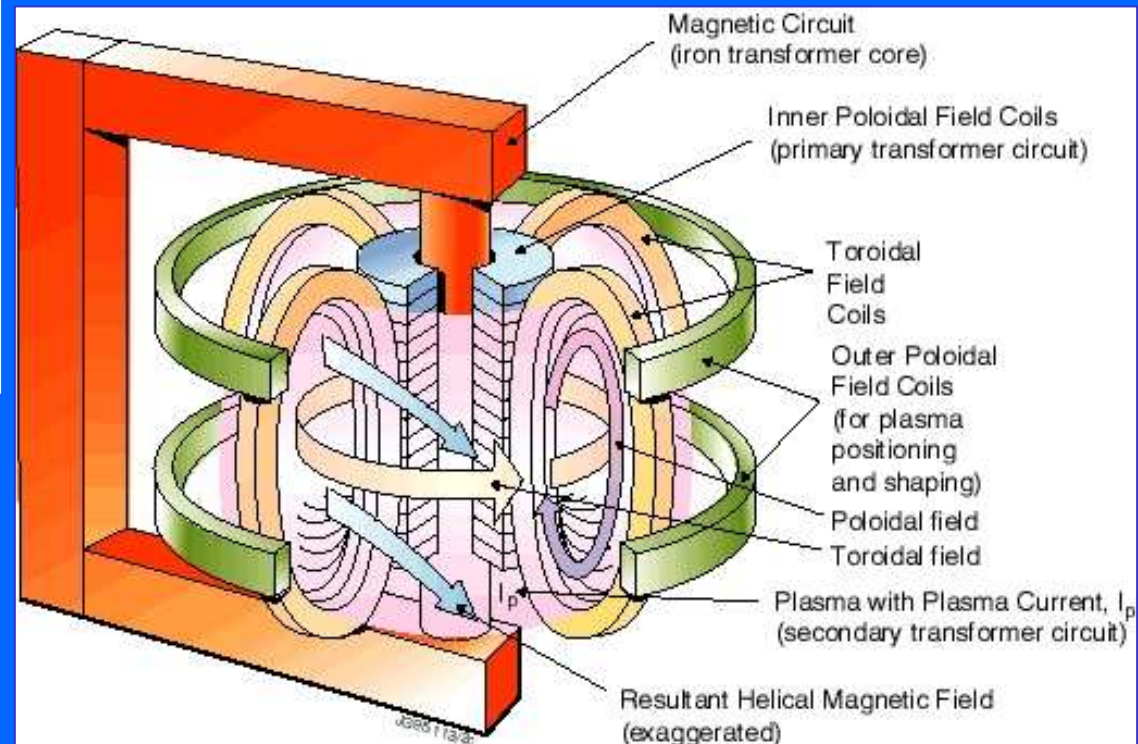
Confinement d'un plasma par champ magnétique



Tokamak (tok : tore, kamera : chambre, mak : magnétique)

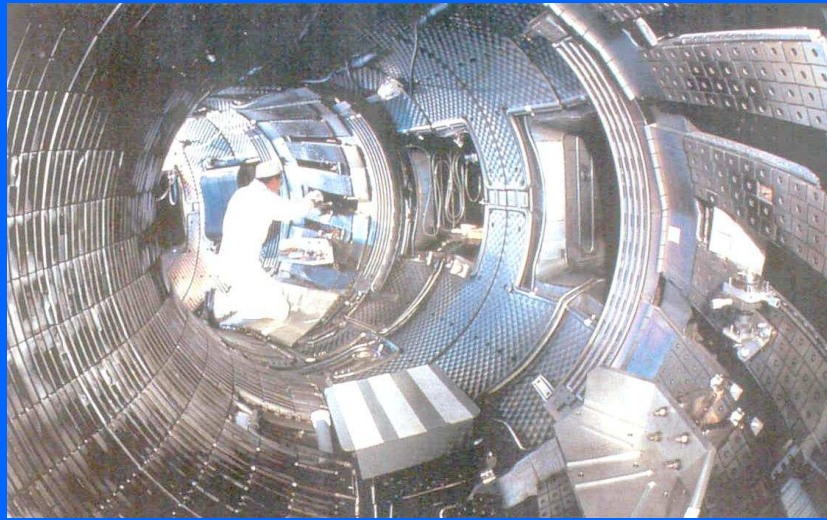
Sous l'action de 2 champs magnétiques (poloïdal et toroïdal), le plasma est chauffé et confiné.

difficulté : maîtriser suffisamment longtemps un plasma suffisamment dense et à haute température pour que la puissance libérée soit $>$ puissance consommée ($Q > 1$).



plasma



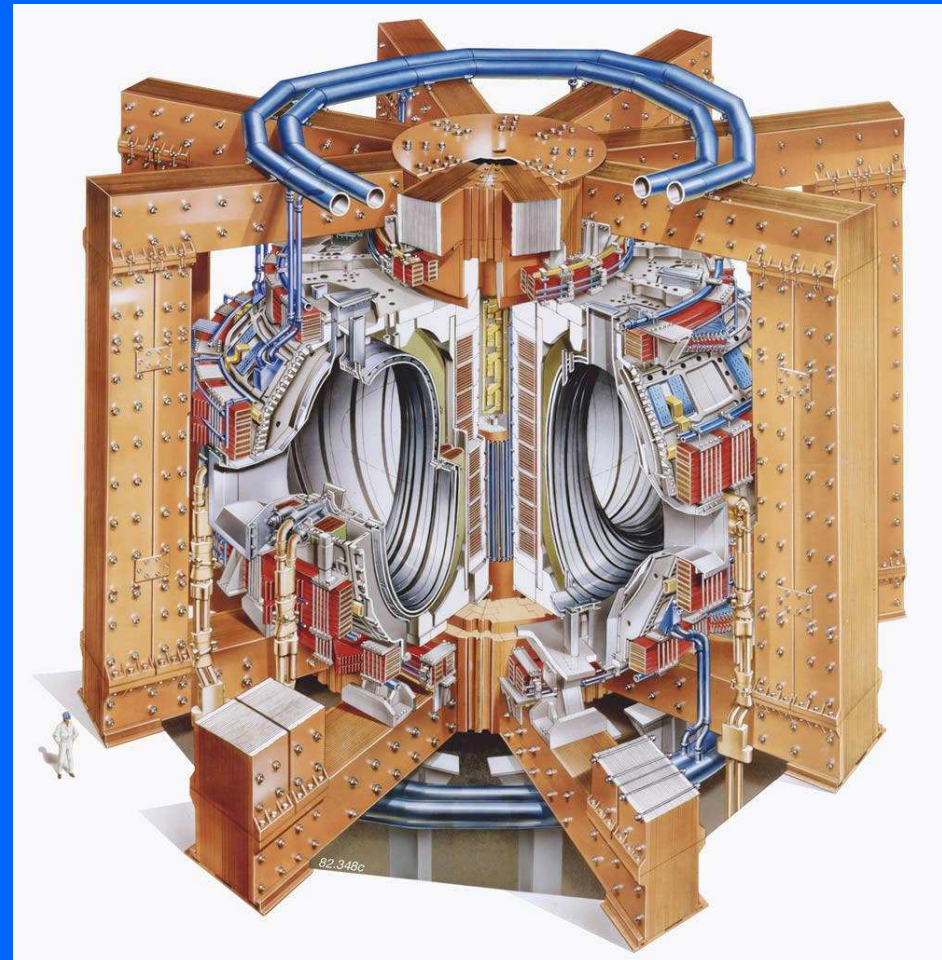
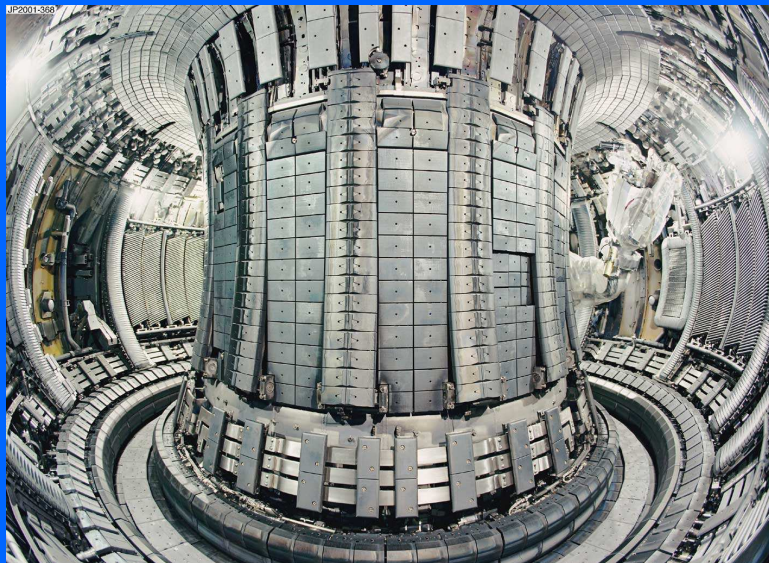


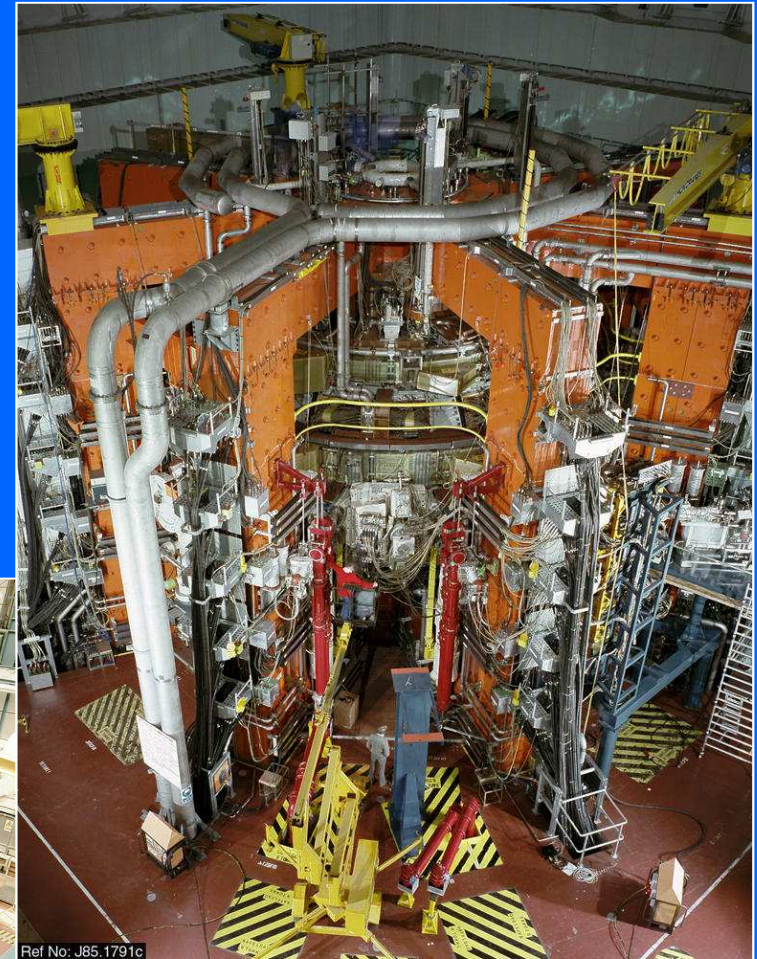
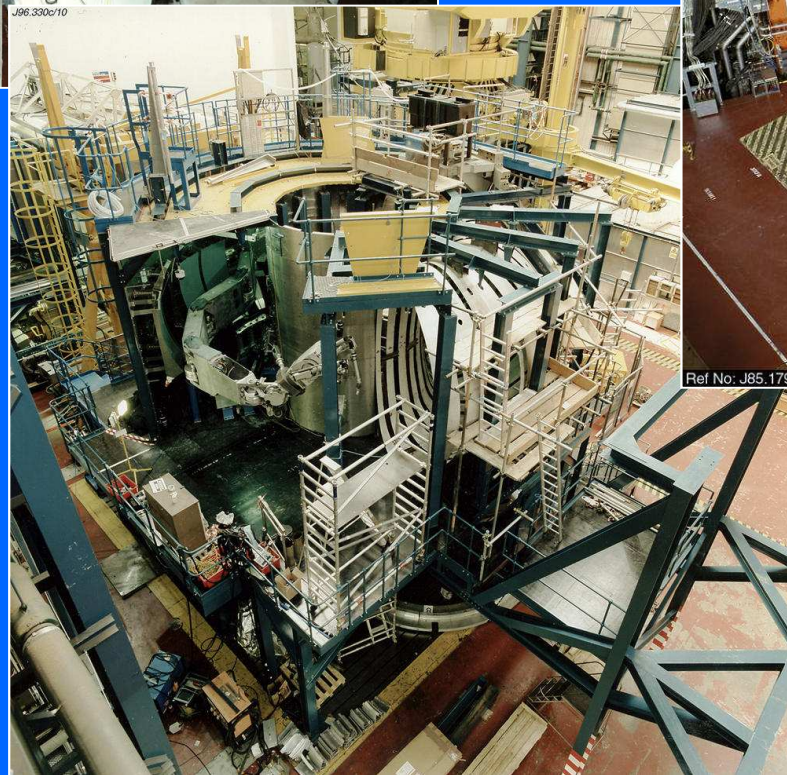
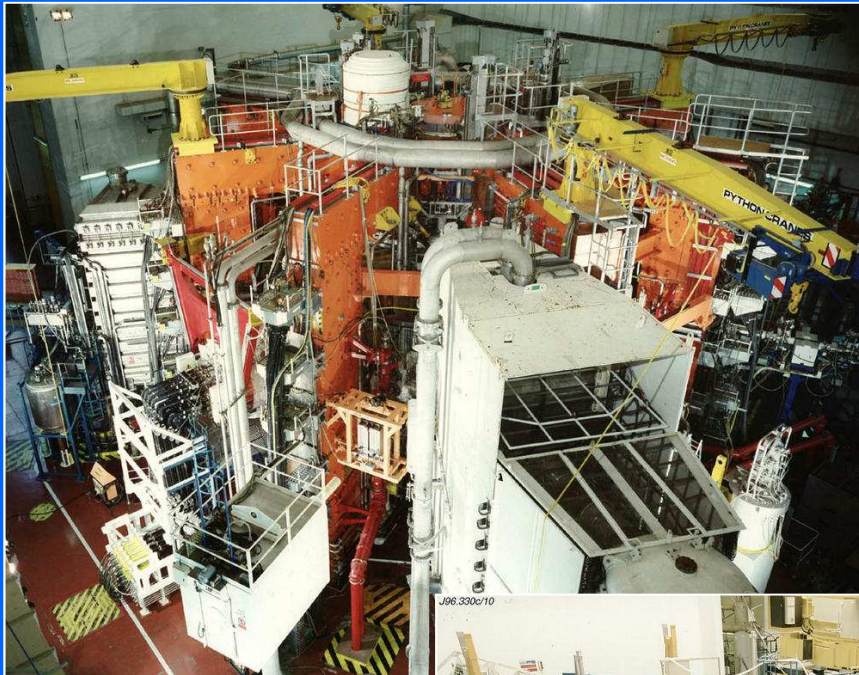
record de durée : Tore Supra (Cadarache)
3 MW : 6 mn 30s

Tore-Supra (Cadarache – 3,8MW)
à aimants supraconducteurs

record de puissance : JET (GB)

- température : 50 à 300 millions de °C
- puissance libérée : 16 MW
- coefficient Q : 0,65

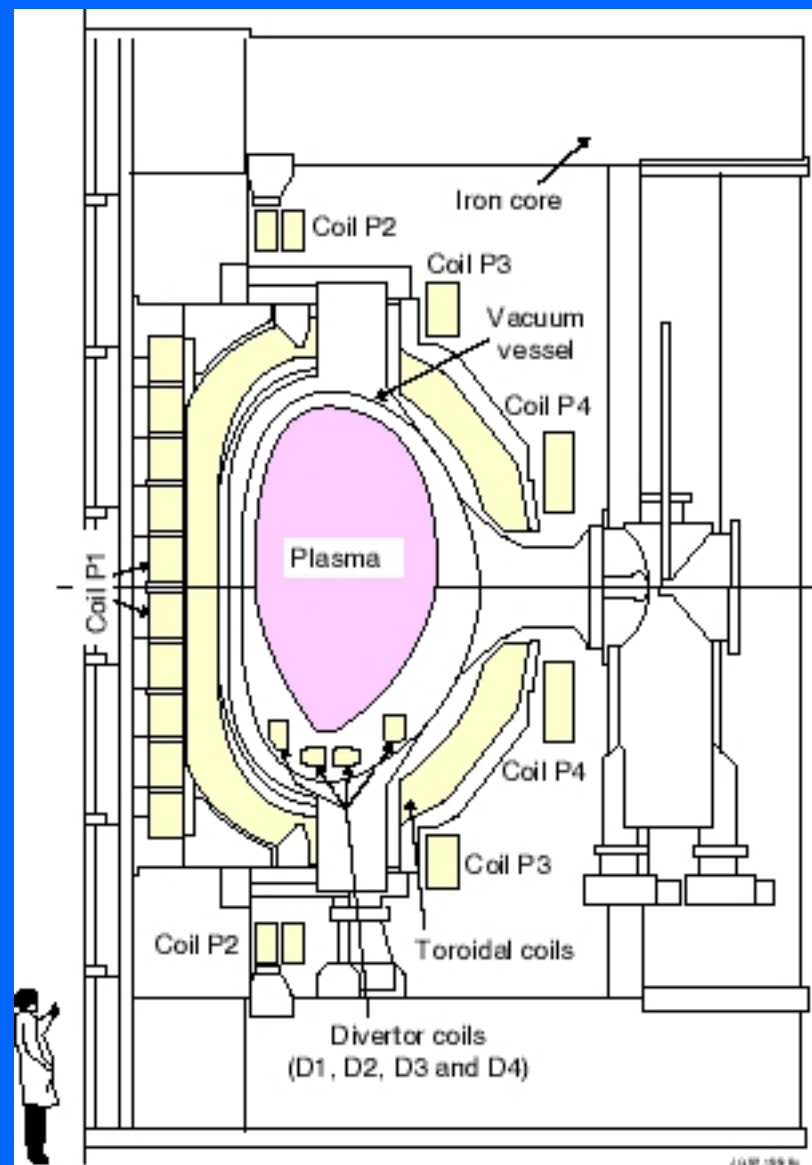




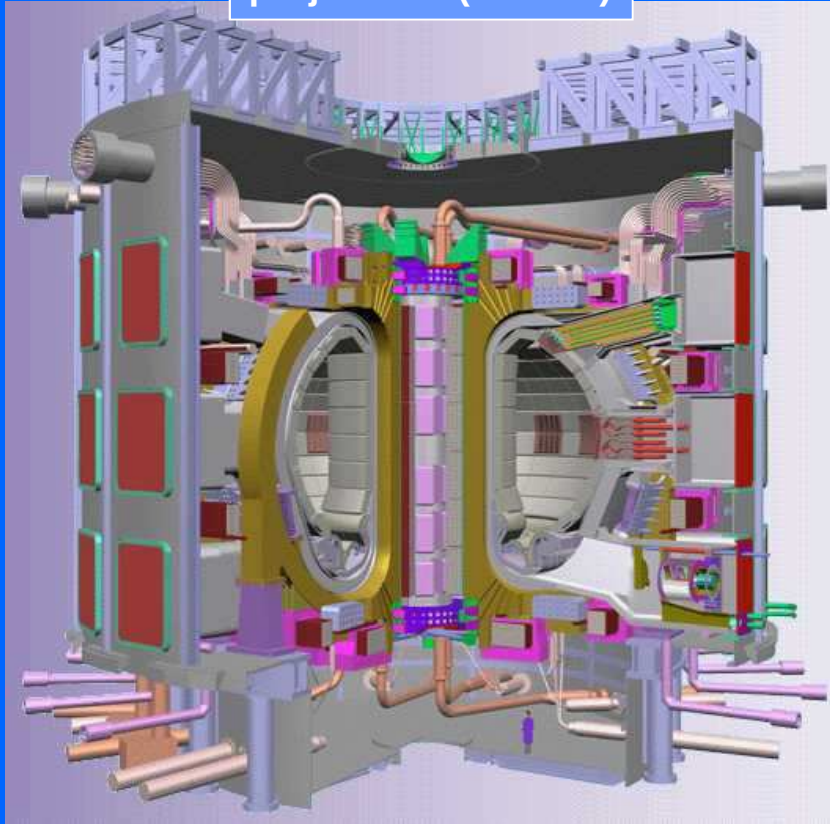
Quelques vues
du JET

Vue en coupe du JET

Volume du plasma : 100 m³



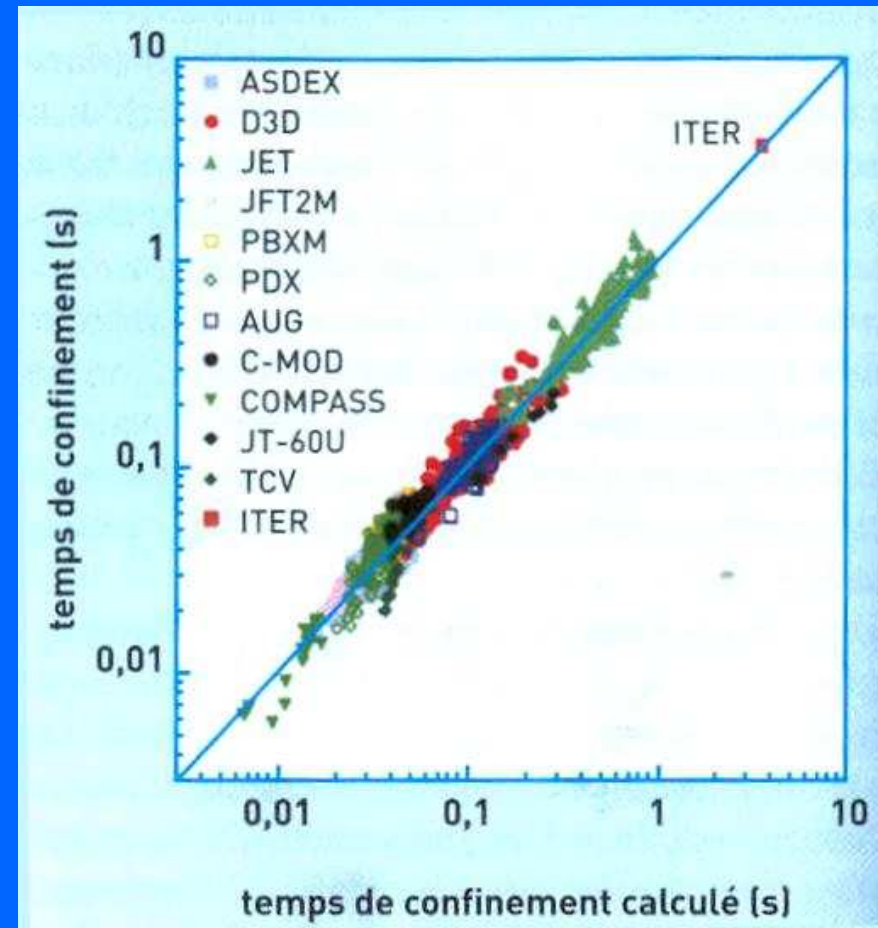
projet ITER (500MW)



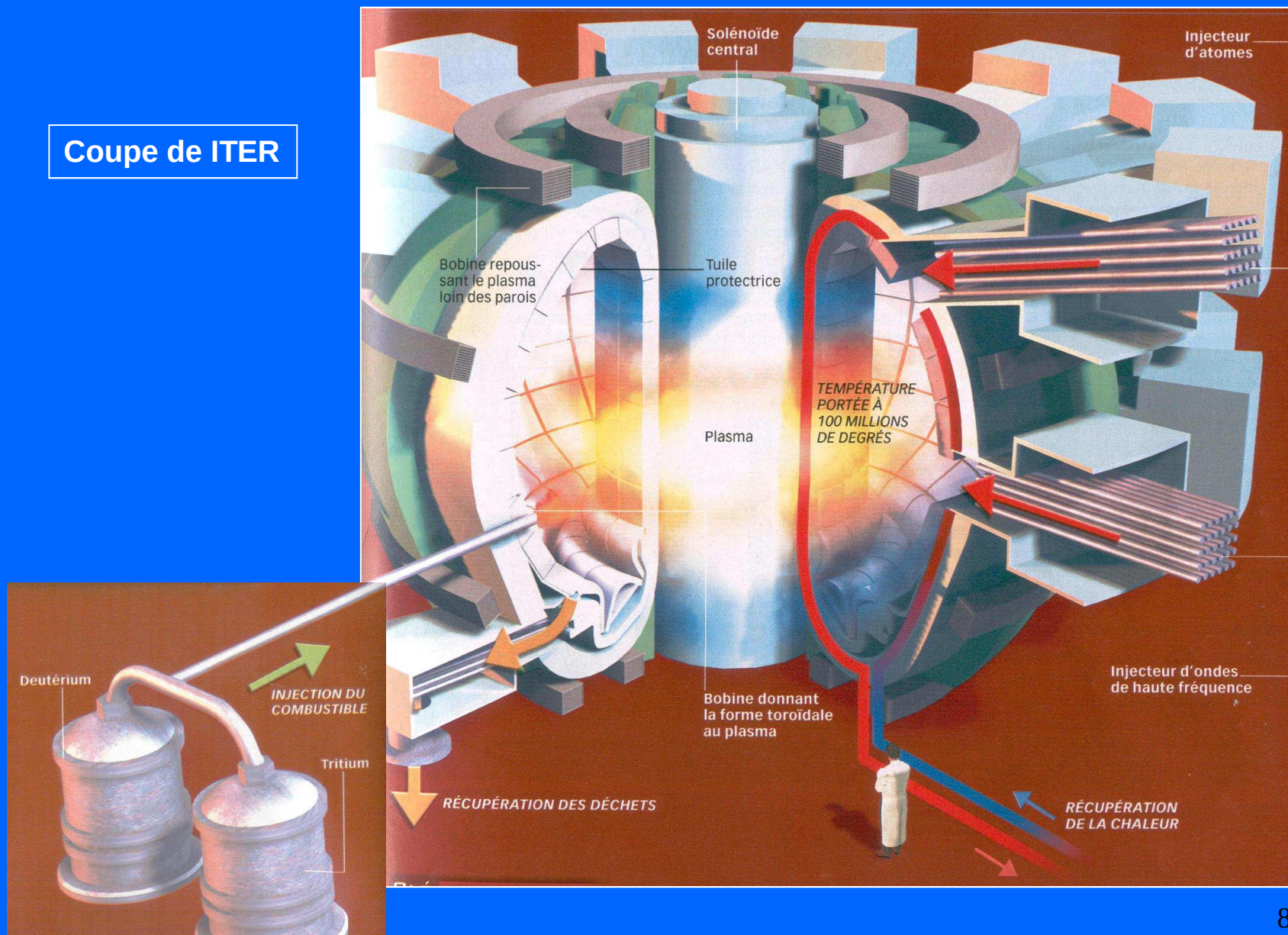
devrait produire de l'énergie !

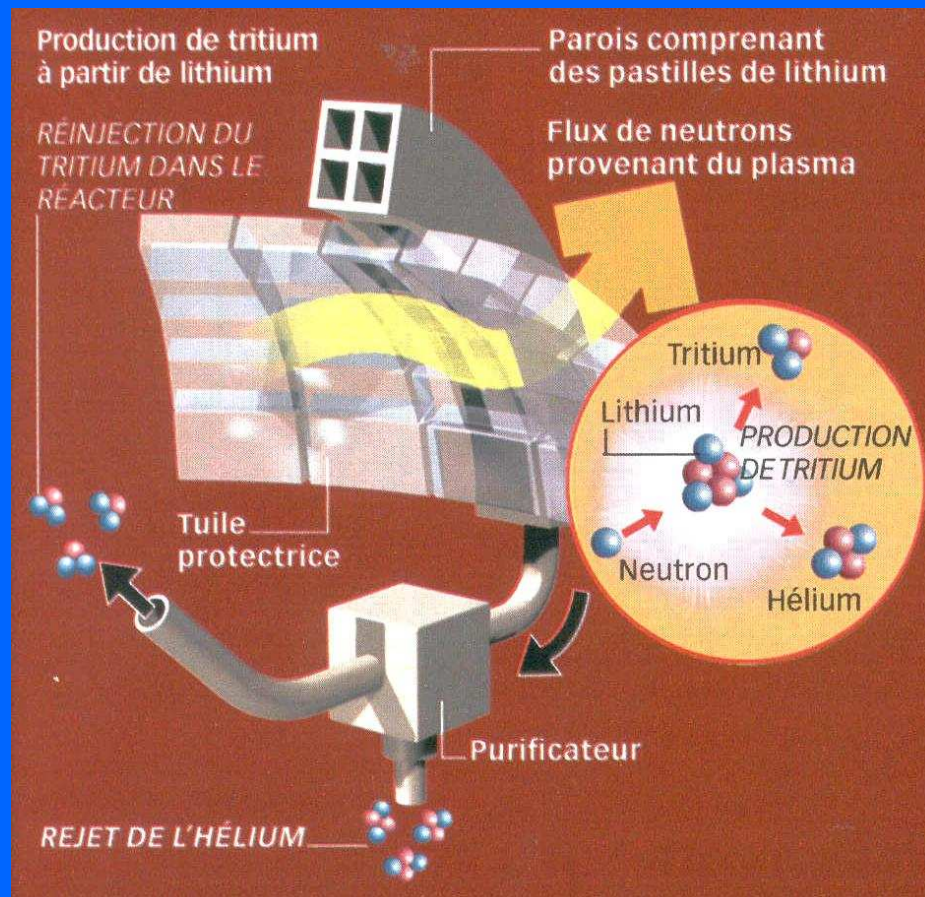
- 20 000 tonnes , près de 30m de haut
- Volume de plasma : 850m³
(Tore Supra : 30m³, JET : 100m³)
- Température du plasma : 150 10⁶ K
- Puissance consommée : 50 MW
- Puissance attendue : 500 MW (Q=10)
- Durée attendue : 400 s

la suite... ITER (2012-2020)
500 MW avec Q>1



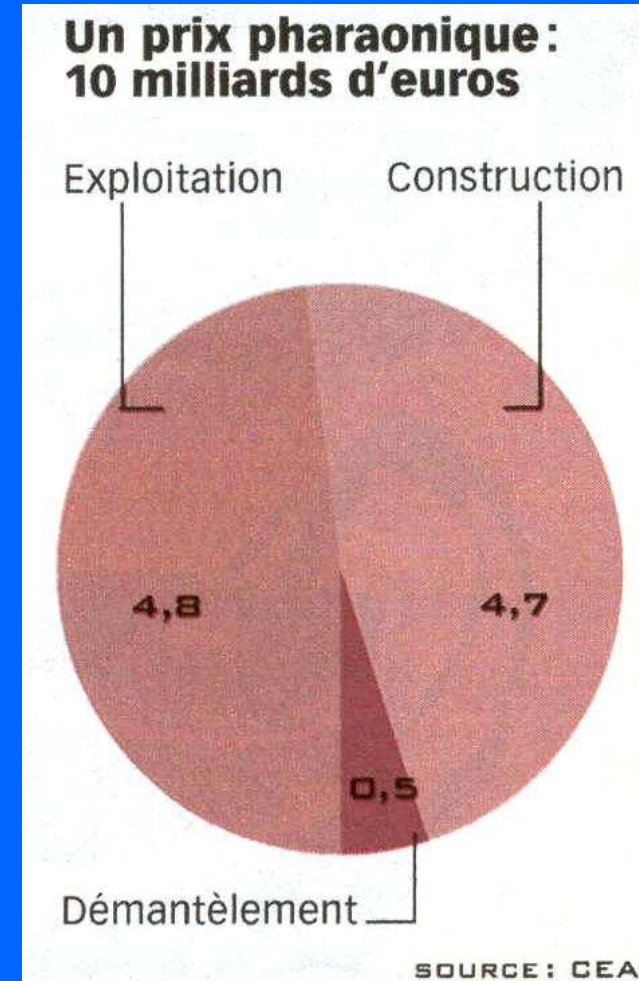
Coupe de ITER



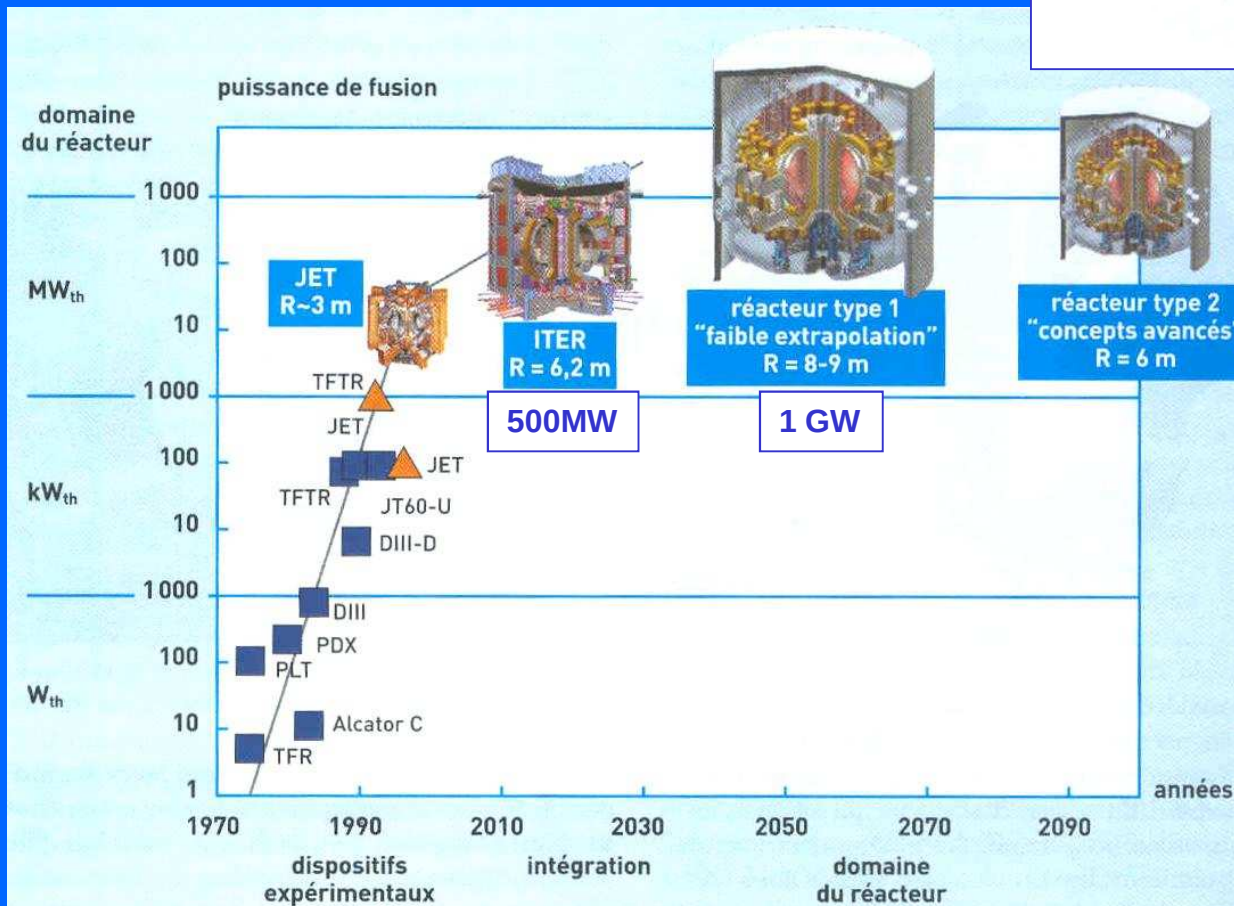
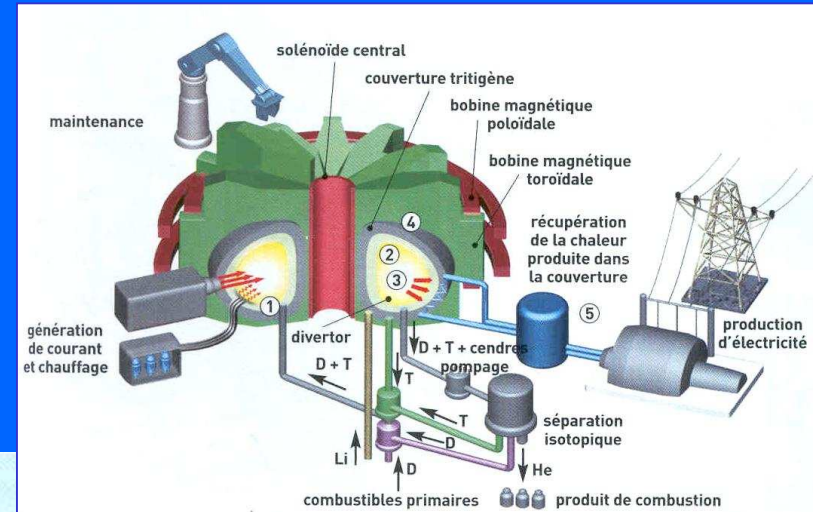


La production de tritium sera continue le long des parois à partir de lithium

Coût total (estimé)
du projet ITER



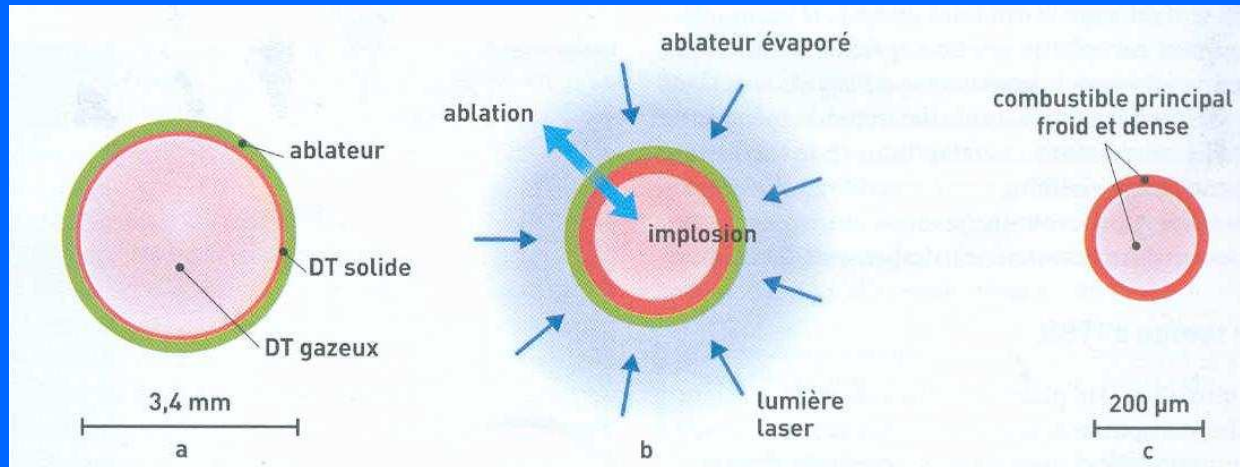
Perspectives d'avenir de la fusion « tokamak »



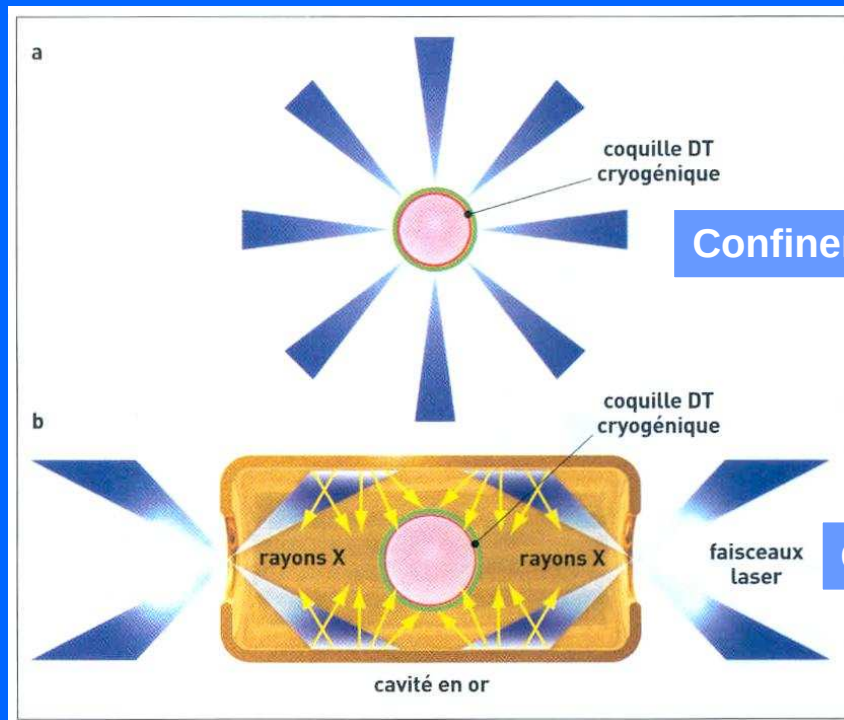
un réacteur industriel ?

2100 ?

Fusion thermonucléaire par confinement laser (implosion)

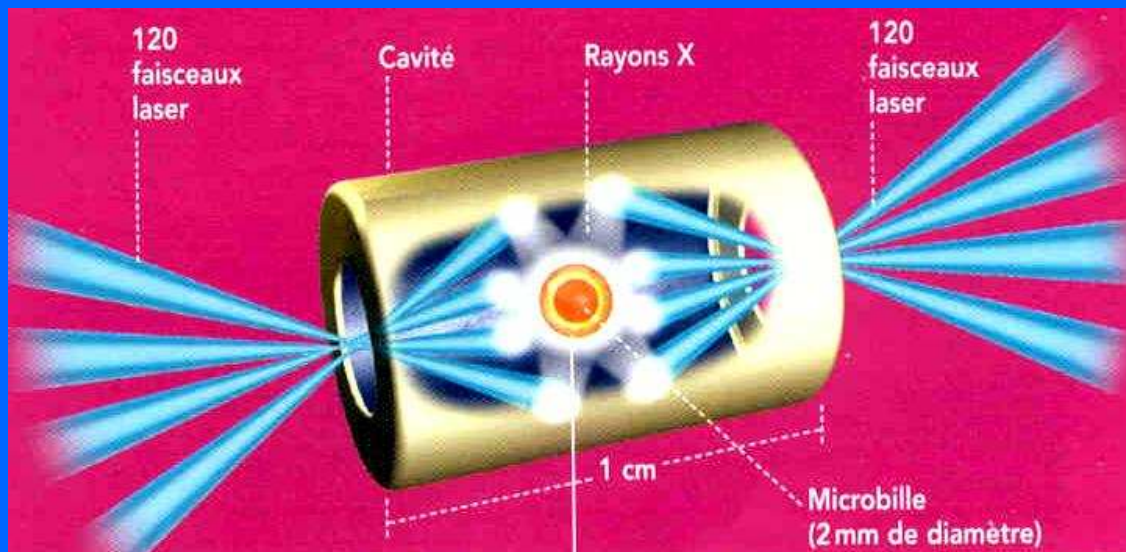


Combustible (D+T) dans une bille de DT à 17K, recouverte d'une couche polymère

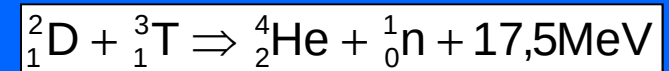
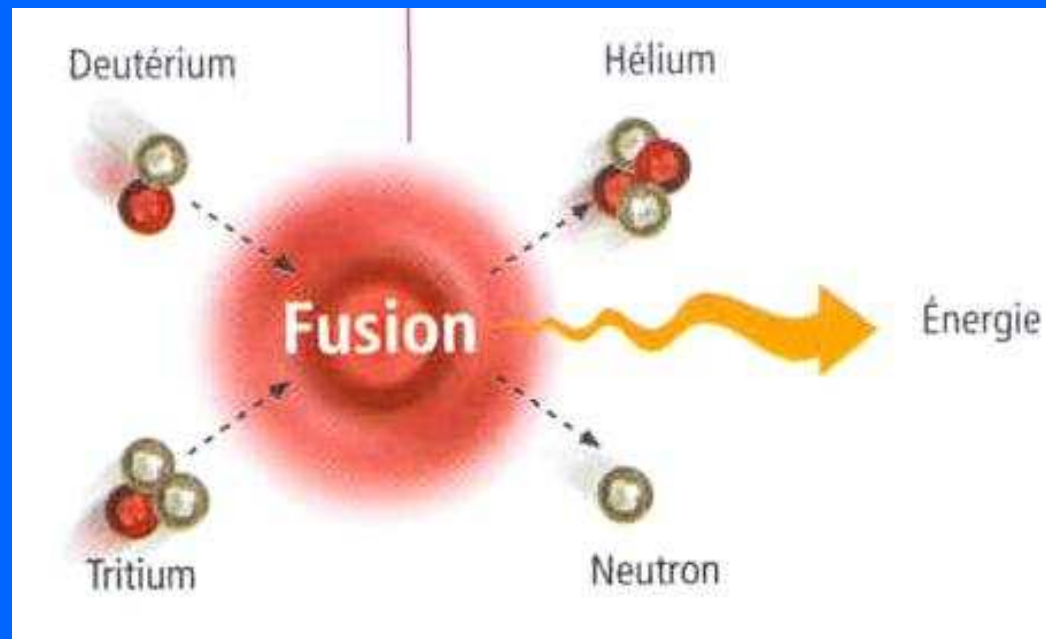


Confinement direct

Confinement indirect (par rayons X)



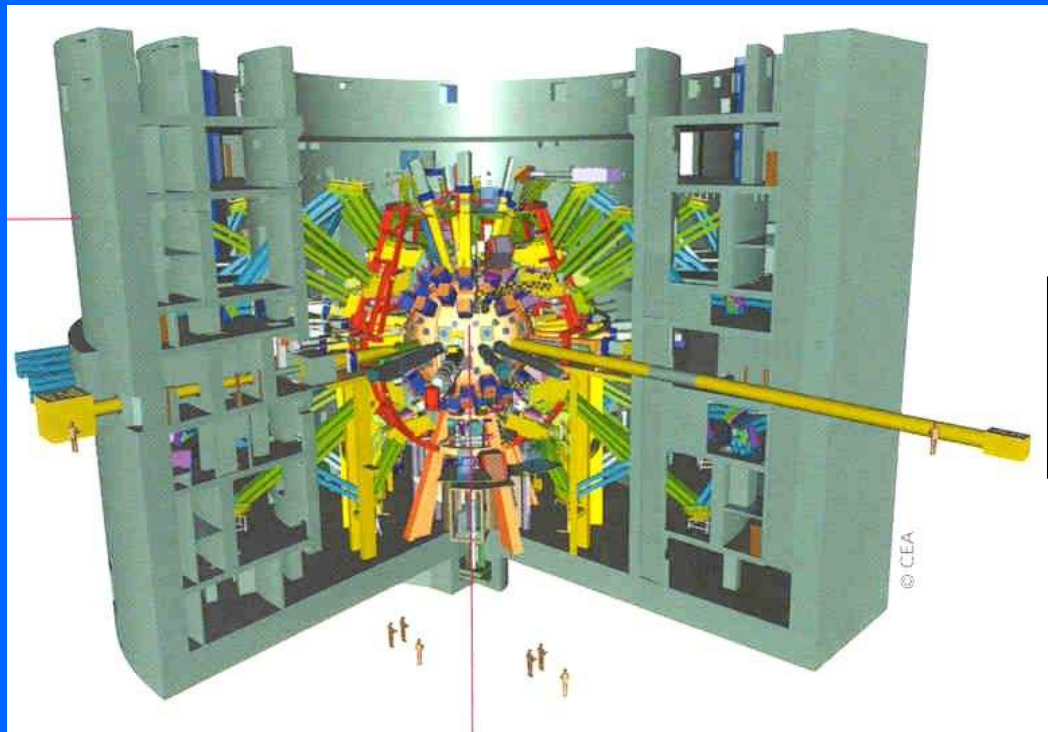
microcible :
constituée d'une cavité contenant
une microbille remplie de LiD.
les faisceaux laser (UV) sont dirigés
sur la paroi de la cavité revêtue
d'une couche d'or.
la fusion sera provoquée par les
rayons X produits par la paroi.



(3,5 MeV)

(14 MeV)

des applications civiles (fusion thermonucléaire contrôlée) pourront être entreprises également



**Laser « mégajoule »
(CEA-DAM - Bordeaux 2009)**

**hall d'expérience (33m de diamètre)
avec la chambre d'expérience
(10 m de diamètre)
où convergent les 240 faisceaux laser**

*but : étudier la fusion thermonucléaire
induite par rayons X*

équivalent du « National Ignition Facility » (Lawrence Livermore Laboratory) prévu pour 2008

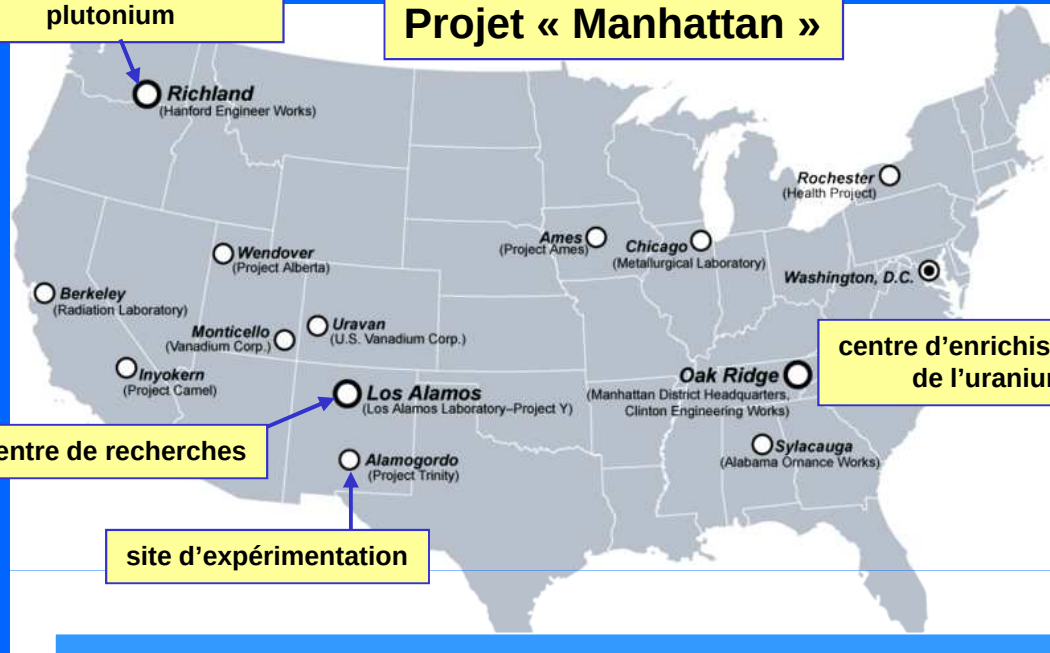
- 240 lasers (30 lignes de 8 faisceaux de 7,5 kJ chacun)
- Énergie libérée : 1,8 MJ (puissance crête 500TW, soit 5000 fois la puissance des centrales électriques françaises, durant une µseconde)
- Longueur d'une ligne laser : 125m
- Occupation au sol : 300m
- Cible : sphères de plastique de 2mm contenant un mélange de D+T solide (-255°C)
- Température atteinte par le plasma (densité 100g/cm³) : 50 10⁶ °C

coût du programme LMJ : 2,14 milliards d'euros

VII – Les armes nucléaires

réacteurs de production
plutonium

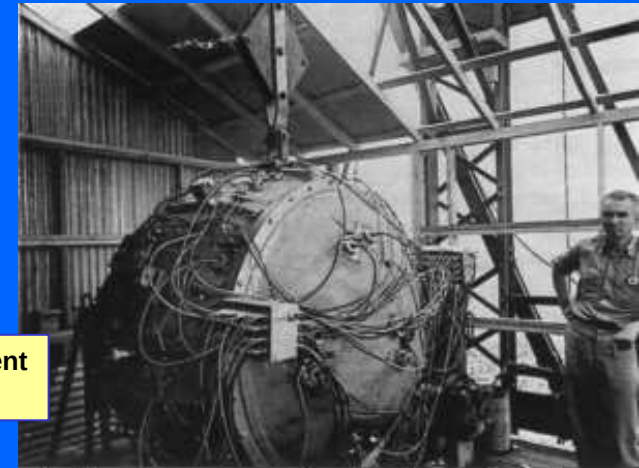
Projet « Manhattan »



centre de recherches

site d'expérimentation

centre d'enrichissement
de l'uranium



Trinity : la toute première bombe au plutonium

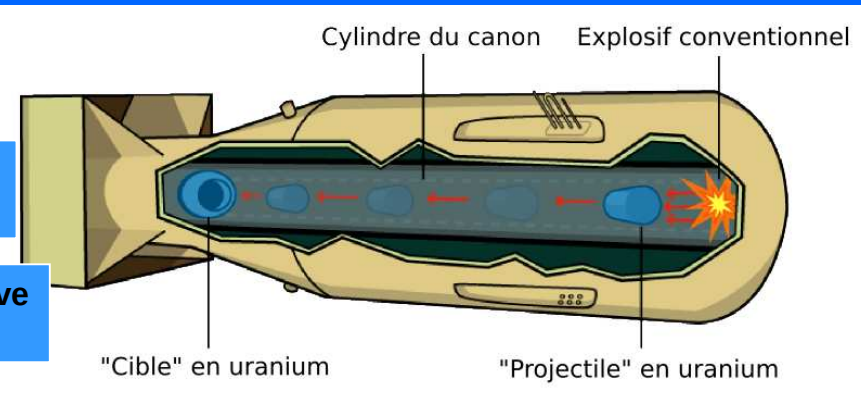
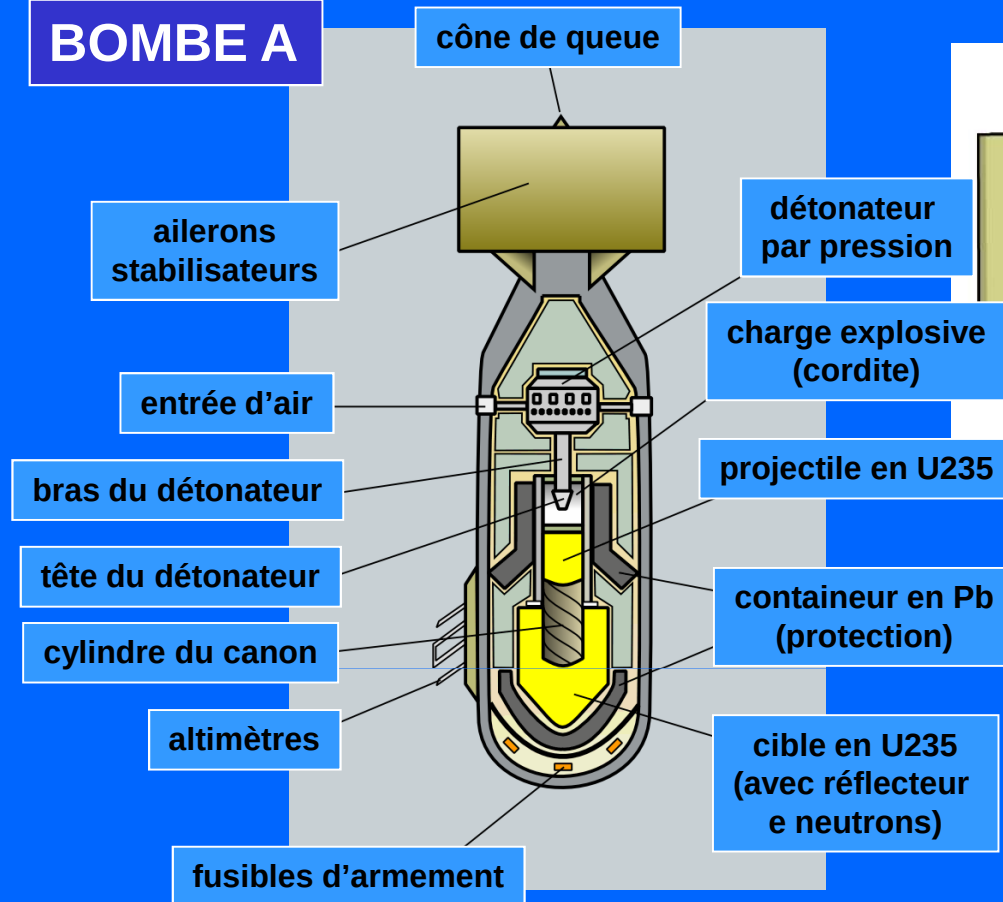
1943-1945 : projet Manhattan
16 Juillet 1945 : 1ère expérimentation (« trinity » Pu^{239})
6 août 1945 : « little boy » sur Hiroshima (15 kT, U^{235})
9 août 1945 : « fat man » sur Nagasaki (22kT, Pu^{239})

Puissance : en tonnes de TNT
1 t TNT = 10^9 calories = $4,18 \cdot 10^9$ J

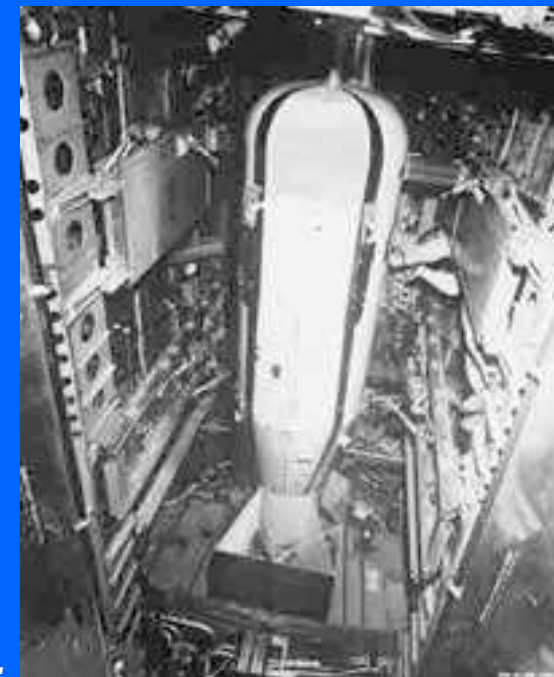
1 kt = $4,18 \cdot 10^{12}$ J = $1,16 \cdot 10^6$ kWh
1kg U^{235} = 17 kt – 1 litre = 300 kt
1 kg (1 litre) (D-T-Li) = 50 kT



BOMBE A



Principe de la bombe A à insertion de type « little boy » à uranium (U^{235})

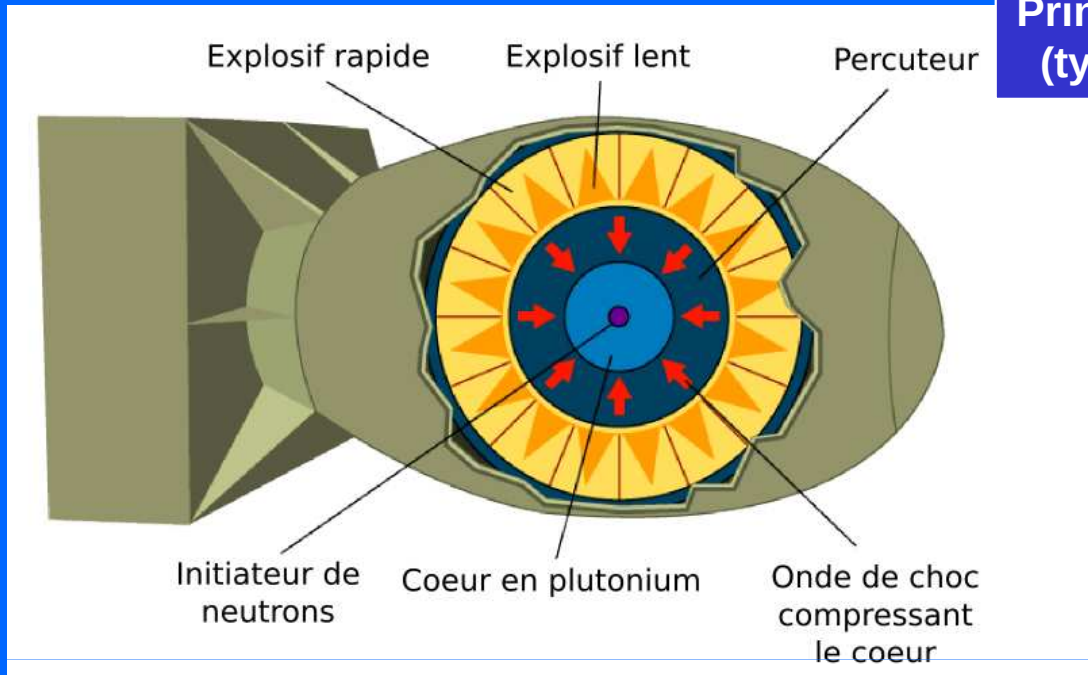


La masse critique est obtenue en projetant une masse sous critique d'uranium dans un autre bloc d'uranium à l'aide d'un explosif puissant. Elle est obtenue en une milliseconde.

➔ technique de l'insertion ou du pistolet

Assez rapide pour l'uranium, trop lent pour le plutonium...

Principe de la bombe à implosion (type « fat man ») au plutonium



Trinity, Nagasaki



Plus complexe, cela consiste à comprimer rapidement (2 à 3 microsecondes) une masse diffuse de plutonium pour obtenir la masse sur-critique
difficulté : obtenir une série d'ondes de compression sphérique à l'aide d'explosifs

l'explosion de la charge chimique provoque une onde de compression qui concentre toute la matière fissile au centre (supérieure à la masse critique) engendrant la réaction en chaîne explosive...

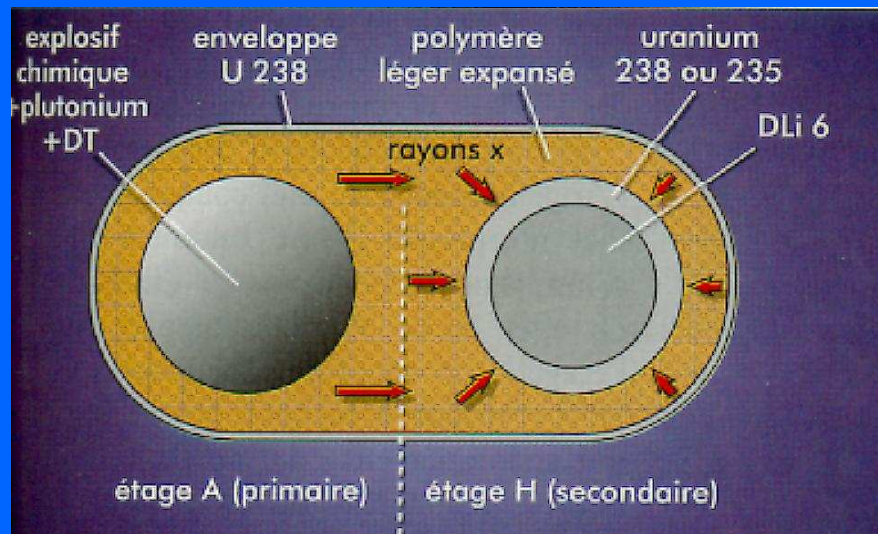
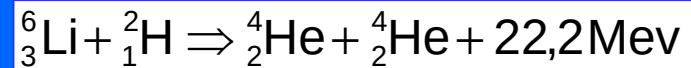
Pour le Pu^{239} , la masse critique est de 11,5 kg (600 cm^3) mais peut descendre à moins de 3kg (150 cm^3) du fait de la forte compression...

Principe de base des têtes nucléaires et thermonucléaires actuelles

BOMBE H

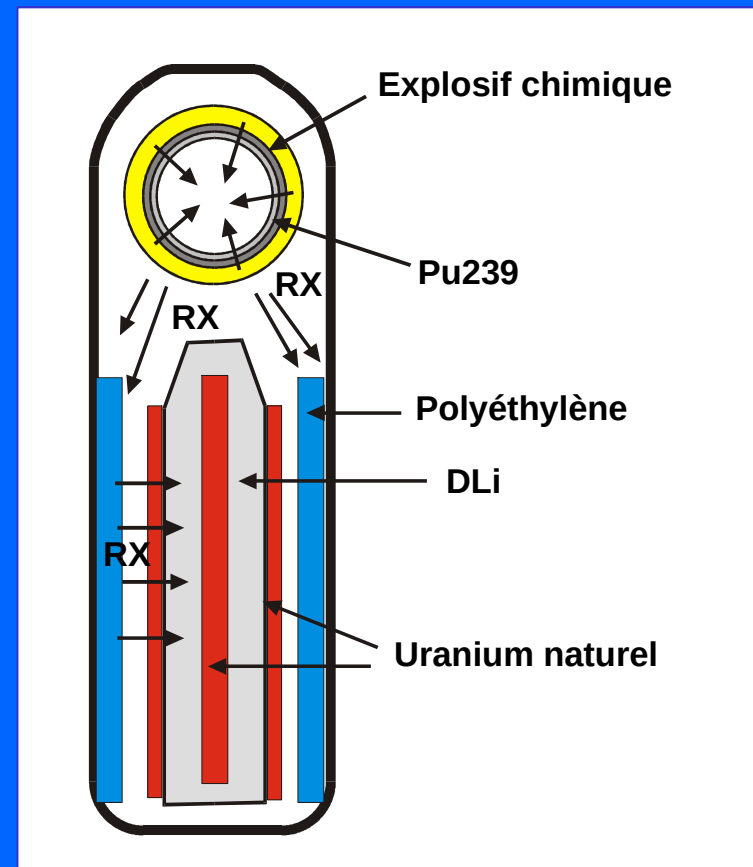
principe de la bombe thermonucléaire
(Ulam - Teller - Sakharov)

l'explosion d'une charge nucléaire à fission produit des rayons X qui vont déclencher la fusion d'une amorce de LiD+LiT solide, entraînant la fusion du combustible LiD



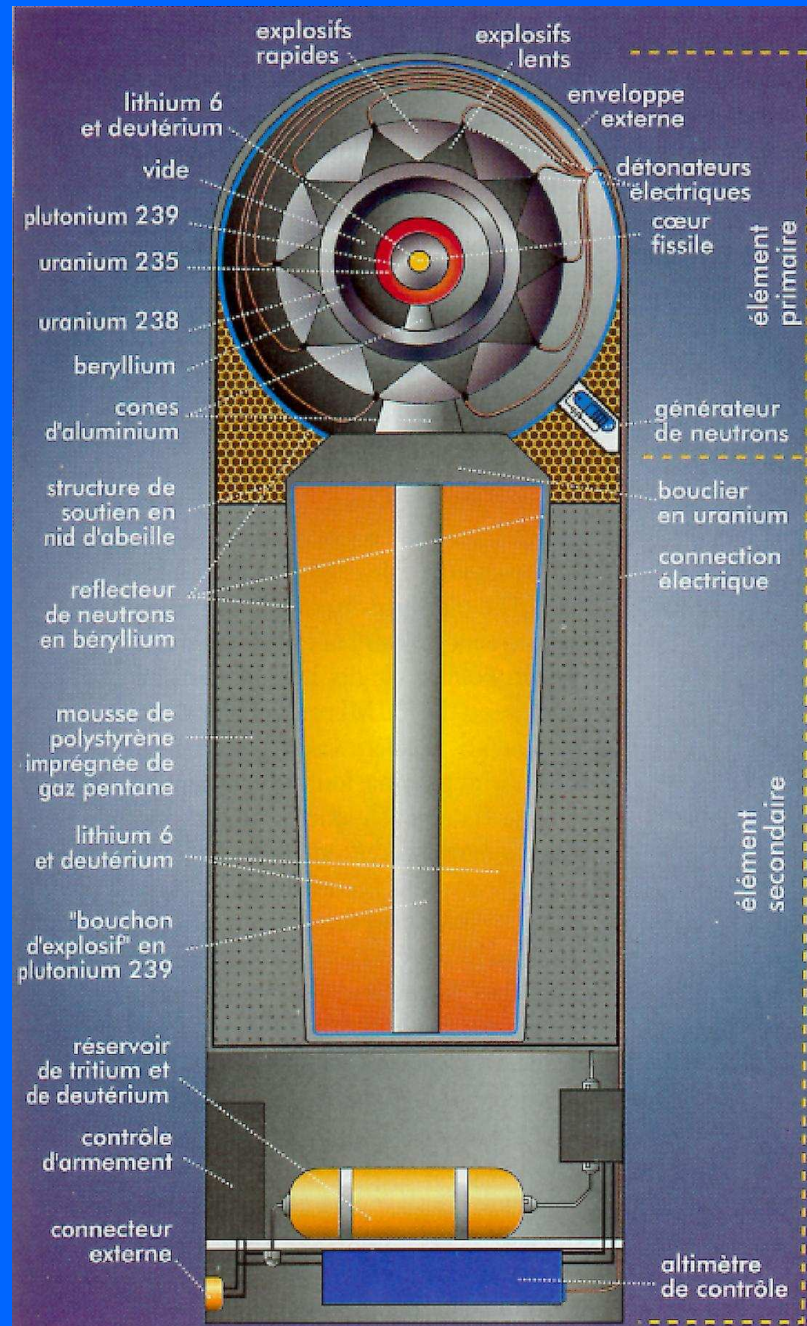
2 étages :

- le premier (fission) libère une grande quantité de rayons X qui comprime le 2ème étage :
- 2ème étage (fission + fusion)



La forte émission de neutrons rapides provoquent la fission d'une enveloppe d'U238 et U235 (bombe 3F : fission-fusion-fission) avec un très fort dégagement d'énergie

Schéma d'une charge nucléaire US



Bombe « 3F » (fission-fusion-fission)
On ajoute une quantité importante d' U^{238} et U^{235} qui fissionne grâce aux neutrons émis lors de la fusion $\Rightarrow$ énergie libérée très importante (peut représenter 60% de la puissance totale libérée, plusieurs Mt)

bombe à neutrons :
bombe thermonucléaire de faible puissance où les effets de souffle sont réduits mais où l'émission de neutrons est amplifiée

Armes nucléaires « propres » compactes :

- mini-nukes (100 T à 5kT)
- bunker-busters (100kT à 1 MT)

en cours de développement pour utilisation tactique contre les ouvrages enterrés (bunker)

Bombe A

16 juillet 1945 – USA
29 août 1949 – URSS
3 octobre 52 – Grande Bretagne
13 février 1960 – France
16 octobre 1964 – Chine
18 mai 1974 – Inde

Afrique du Sud, Israël (79), Pakistan (98), Corée du Nord (06)

Bombe H

1 novembre 1952 – USA
12 août 1953 – URSS
15 mai 57 – Grande Bretagne
17 juin 1967 - Chine
14 août 1968 – France

Nombre de têtes disponibles :

Russie : 8200 (+10000 en attente)
USA : 7650 (+3000 en attente)
Chine : 400
France : 250 à 300 (500?)
Grande Bretagne : 200
Pakistan : 24 à 48
Inde : 30 à 40 (150?)
Israël : 200
Corée du Nord : 1 à 6

Essais nucléaires :

USA : 1057
Russie : 715
France : 210
Chine : 46
Grande Bretagne : 45



« castle bravo »
(Bikini)
15 Mt (1954)

bombe A : puissance maximale : 225 kt
bombe A dopée
(1951 USA atoll d'Eniwetok Pacifique)

bombe H : pas de limite...
puissance maximale testée : 57 Mt (URSS)

Essai de 23kt
(USA 1953)



Total des bombes
lancées sur l'Allemagne :
3 Mt



La plus puissante bombe testée

Ivan (Tsar bomba)

(Nouvelle Zemble 31 octobre 1961)

57 Mt

- diamètre de la boule de feu : 7km
(300m pour 10 kt, 4 km pour 10 Mt)
- hauteur du champignon : 64 km
- diamètre du champignon : 30 à 40 km

*25% de toutes les retombées radioactives
depuis 1945 !*

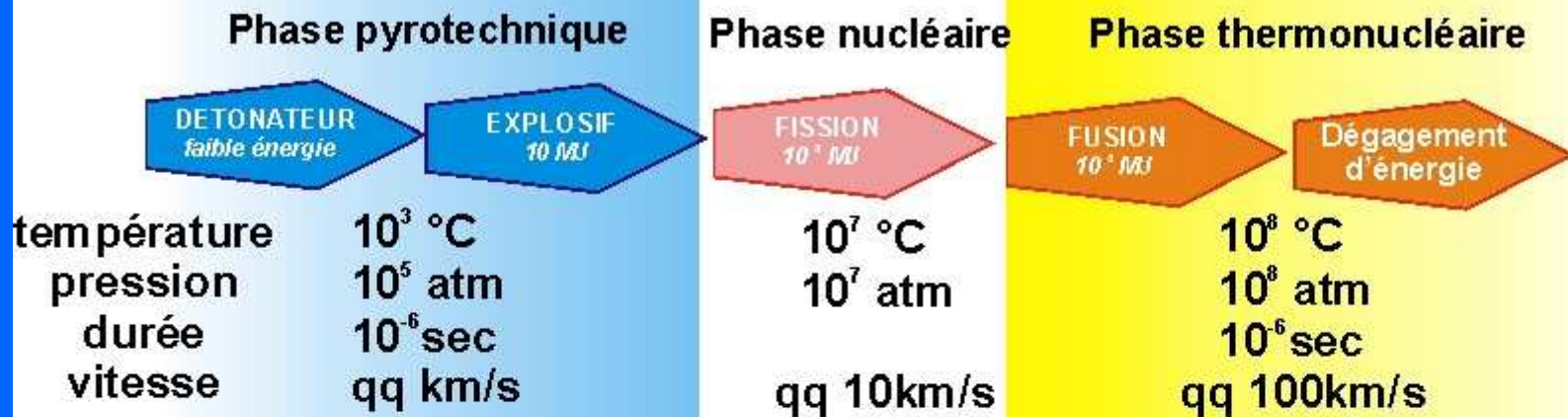


Traité d'interdiction des essais nucléaires → projet de simulation numérique

USA : projet ASCI

France : projet « simulation » du CEA-DAM

LES PHASES DU FONCTIONNEMENT NUCLEAIRE



PROGRAMME SIMULATION

validation
expérimentales

AIRIX
validation par partie

Laser Mégajoule
validation par partie

Données

Données

simulation
numériques

TERA modélisation et simulation

Données

données
expérimentales

ESSAIS NUCLEAIRES PASSES validation globale

quelques dizaines d'essais sélectionnés sur les 210

Quelques adresses web

http://www.lal.in2p3.fr/CPEP/adventure.html	<i>(aventure des particules)</i>
http://superstringtheory.com	<i>(théorie des cordes)</i>
http://www.in2p3.fr	<i>(physique nucléaire)</i>
http://www.laradioactivite.com	
http://cmsinfo.cern.ch	
http://www.cea.fr	
http://www.edf.fr	
http://www.sfen.fr	<i>(Société française d'énergie nucléaire)</i>
http://www.ecolo.org	<i>(Association des écologistes pour le nucléaire)</i>
http://www.bcpl.net/~kdrews/mtas/modern.html	<i>(structure atomique)</i>
http://www.sciences.univ-nantes/physique/perso/ardouin/cours/ch3	<i>(noyau atomique)</i>
http://www.sciences.univ-nantes/physique/perso/blanquet/fra me2.html	<i>(physique)</i>
http://molaire1.club.fr/plan.html	<i>(histoire amusante de la physique)</i>