

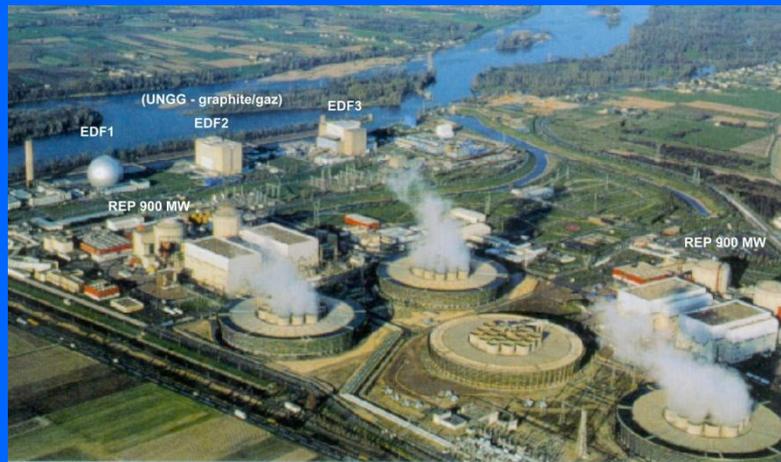


L'énergie nucléaire

et la gestion des déchets nucléaires...



Jacky RUSTE
Ingénieur INSA Génie physique
Docteur Ingénieur Université de Nancy 1



jacky.ruste@free.fr
<http://micro.icaunais.free.fr>

L'énergie nucléaire c'est :

7 % de l'énergie primaire produite dans le monde

15 % de l'électricité mondiale

30 % de l'électricité de l'Union Européenne

75 % de l'électricité française

Données fin 2011

434 réacteurs en service dans 31 pays (369 GW)

5 réacteurs hors service longue durée (2011)

1 réacteur arrêté

4 mises en service en 2011 :

Chine, Inde , Corée du Sud, Pakistan

67 en construction

28 en Chine (4 EPR)

5 en Inde

5 en Corée du Sud

10 en Russie

1 en France

(55 hors OCDE)

499 en projet (dont 19 EPR)

51 en Chine (70 à 80 d'ici 2020)

9 en Russie

6 en Corée du Sud

5 en Inde...

Si certains pays renoncent (Italie) ou veulent « sortir » du nucléaire (Allemagne, Suisse, Belgique, Japon), d'autres (Grande Bretagne, Pologne, USA, Turquie, etc.) envisagent la construction de nouveaux réacteurs.

Selon l'AIE, la puissance totale des installations nucléaires devrait atteindre 630 GW en 2030, soit 60% de plus qu'en 2010.

Début 2012 :

- 2 mises en service (Corée du Sud)
- 1 arrêt définitif (Grande Bretagne)
- 1 nouveau chantier (Russie)

Les générations de réacteurs nucléaires (exemple français)

1^{ère} génération (1950 – 1970)

- réacteurs expérimentaux (ZOE)
- prototypes : Chooz (REP), Brenillis (eau lourde)
- filiale française UNGG (Uranium Naturel, Graphite, Gaz)

2^{ème} génération (1970 – 2020)

réacteurs actuels (REP 900, 1300, 1500 MW)
(REP : réacteur à eau pressurisée)

3^{ème} génération (2020 – 2100)

Extrapolation des filières actuelles : EPR, Atméa...

4^{ème} génération (2035 –)

- Nouveaux concepts (6) :
- réacteurs à neutrons rapides (Na, Pb, gaz...)
 - réacteurs à haute température
 - réacteurs à sels fondus

Fruits de la collaboration entre divers pays (Europe, USA, Chine, Russie...)...

Un réacteur à neutrons rapides (Astrid) devrait être construit en France

Les USA ont choisi de construire un réacteur « haute température à gaz » conçu par AREVA

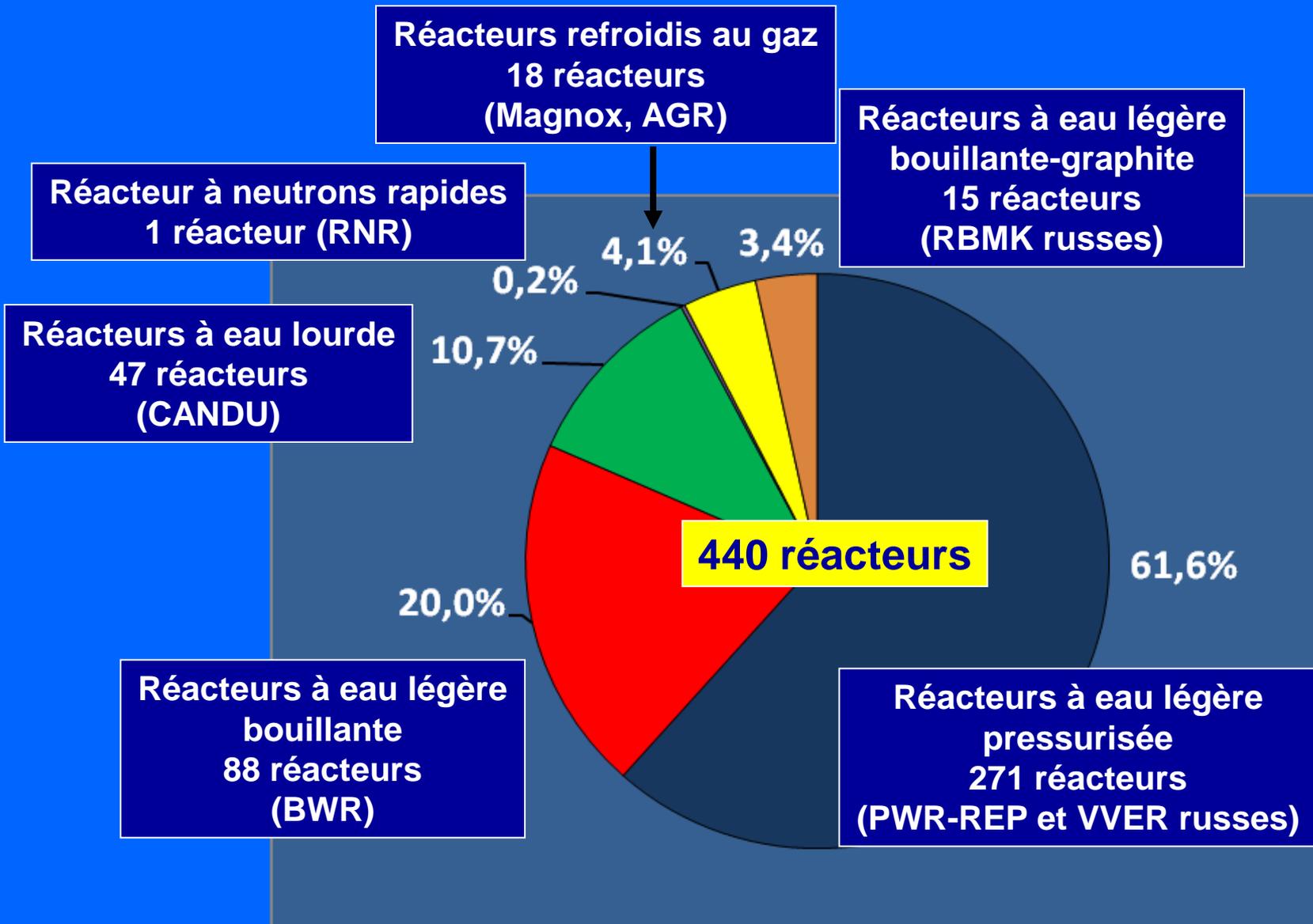
REP 900MW

UNGG

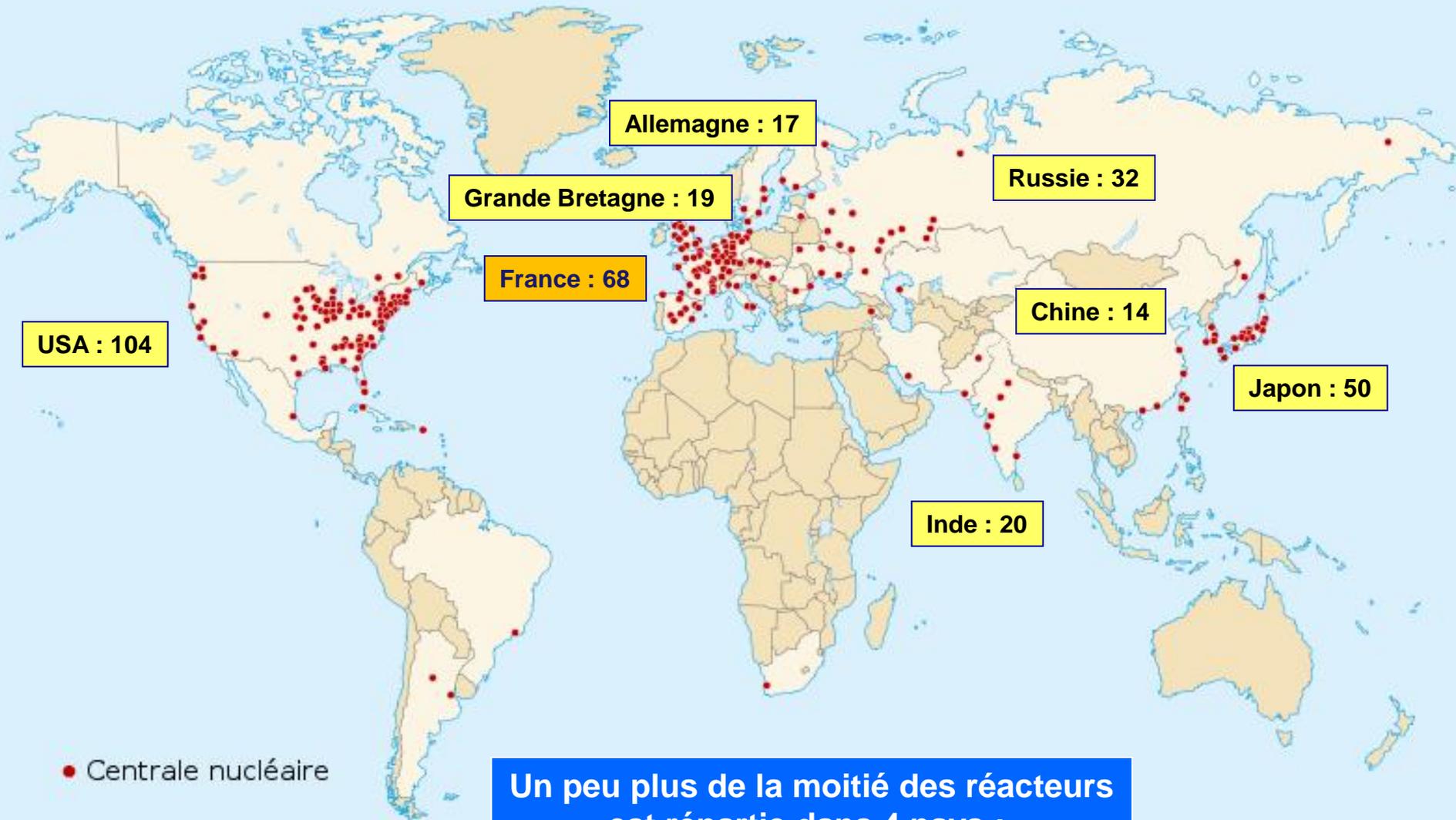


Bugey

Les différentes filières de centrales nucléaires dans le monde (2011)



Les centrales nucléaires dans le monde (et nombre de réacteurs)



Un peu plus de la moitié des réacteurs est répartie dans 4 pays :
USA, France, Japon et Russie

L'énergie nucléaire dans le monde

369 GW

Proportion de la puissance nucléaire installée

50 réacteurs

3 - Japon 12,3%

Corée du Sud 4,2%
Ex Europe de l'Est 3,6%

Finlande 0,7%
Espagne 2,1%

Suède 0,9%
Belgique 1,6%
Royaume Uni 5,8%

Union Européenne (27)

138 000 MWe (38%)

Reste du monde 6,2%

Ukraine 3,1%
Russie 5,8%
Canada 2,8%

27,4%

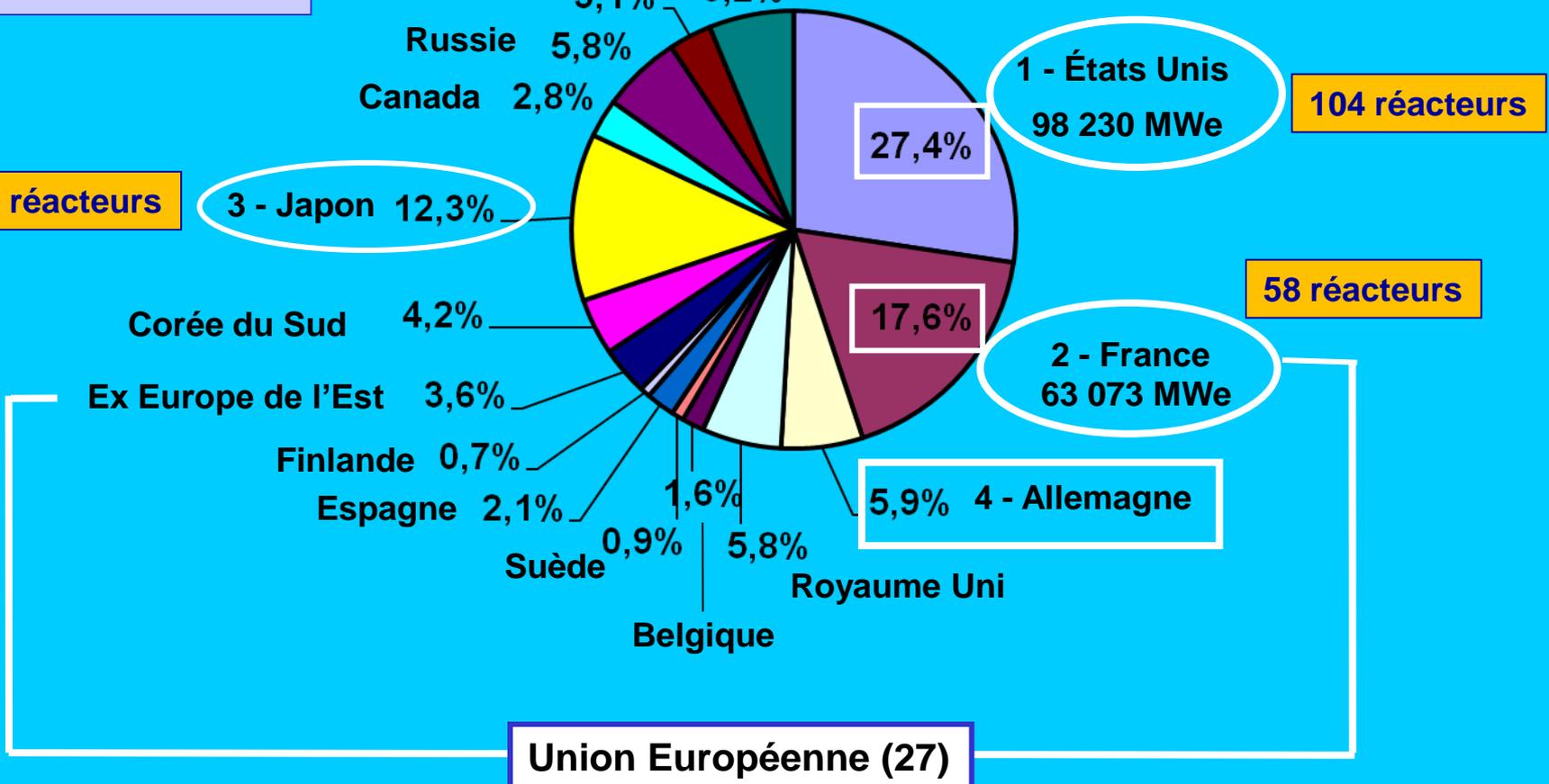
1 - États Unis
98 230 MWe

104 réacteurs

58 réacteurs

2 - France
63 073 MWe

5,9% 4 - Allemagne



Le programme électronucléaire français

19 centrales, 58 tranches opérationnelles – Capacité totale : 63500 MWe

(11 tranches déclassées 2770 MW, 1 tranche à l'arrêt 1200 MW, 1 tranche en construction 1600 MW)

Coefficient de disponibilité : 83% - coefficient de production : 76%

 Graphite-gaz (UNGG)

 RNR (rapide)

 REP (eau pressurisée)

(1994) date d'arrêt du dernier UNGG du site

 320 MW déclassé (Chooz)

 900 MW (CPO, CPY)(34) 1977 - 1987

 1300 MW (P4, P'4)(20) 1984 - 1993

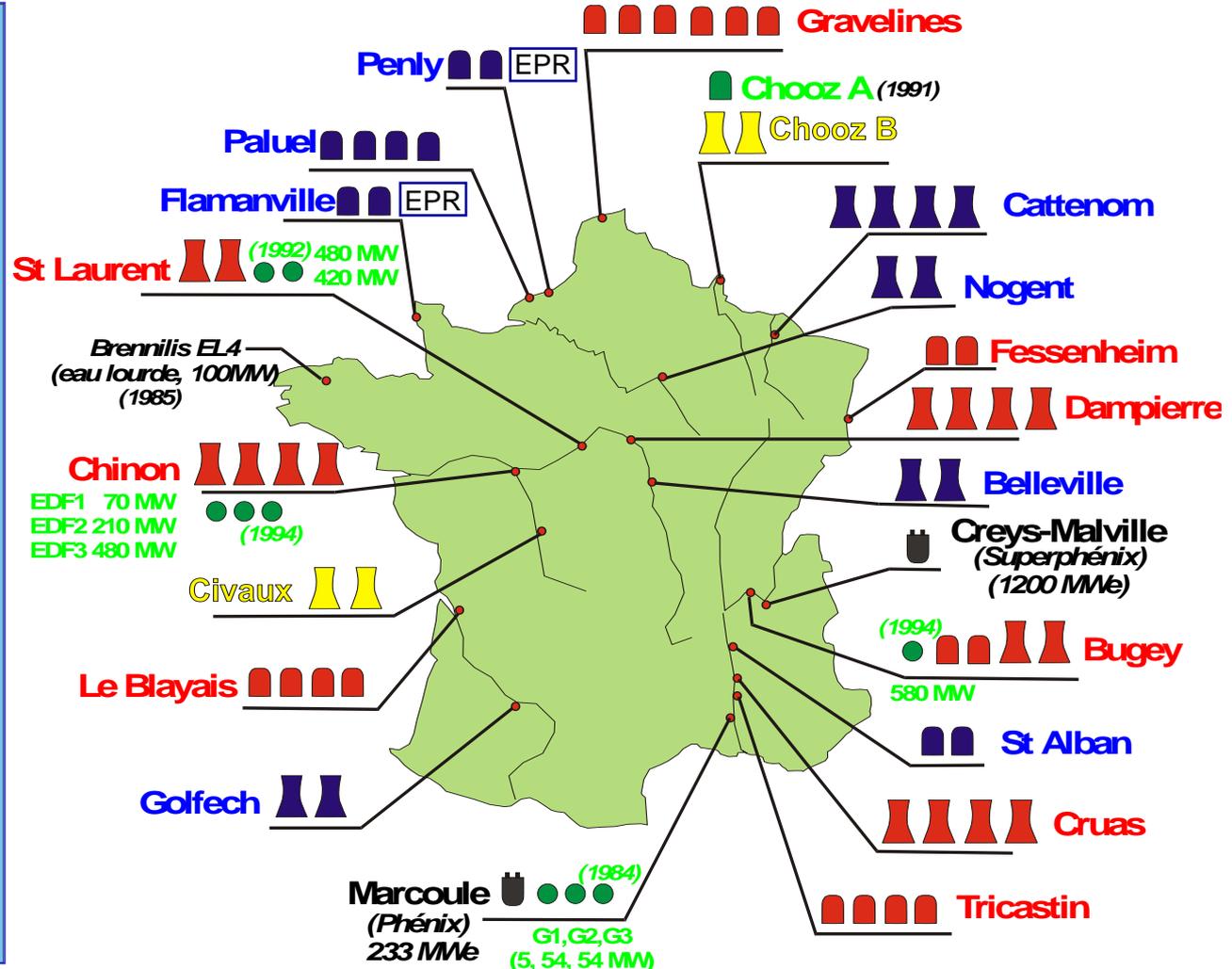
 1400 MW (N4)(4) 1996 - 2000

2008-2030 : EPR (1600 MW)

Refroidissement :

 En circuit ouvert

 En circuit fermé (aéroréfrigérant)



Le programme électronucléaire français :

En 1974, la France disposait de 6 réacteurs « graphite-gaz » (UNGG), d'un réacteur à eau lourde (Brennilis) et d'un réacteur à eau légère pressurisée (REP) (Chooz) ; d'autres REP étaient en construction (Fessenheim, Bugey)

mars 1974 : premier choc pétrolier...

facture pétrolière :

1972 : 15 milliards de frs (2,3 milliards d'€)

1974 : 52 milliards de frs (8 milliards d'€)

1981 : 162 milliards de frs (25 milliards d'€) (2006 : 46 Mds€)

Un vaste programme de construction de centrales nucléaires est engagé...

**coût du programme (58 réacteurs mis en service entre 1978 et 2001) :
120 milliards d'€ (800 milliards de frs)(financement EDF)**

Le choix se porte sur la licence Westinghouse REP (abandon du REB)

coût de l'électricité nucléaire :

- centrales actuelles : 32 € le MWh (plus faible après 40 ans)

- EPR : 25 € le MWh

le prix de l'uranium n'intervient que pour 5% !

En France :

Les principaux acteurs :

EDF (Maître d'œuvre, exploitant, recherche)
GDF-Suez (exploitant)
CEA (recherche)
AREVA (constructeur)
Alstom (industriel)

L'industrie nucléaire en France maîtrise toutes les étapes :

- exploitation du minerai
- combustible et enrichissement
- conception et construction de réacteurs
- maintenance et pièces détachées
- recyclage du combustible et gestion des déchets

Perspectives :

1 EPR en construction (Flamanville)

1 EPR programmé (Penly) ?

projet de réacteur de moyenne puissance ATMEA 1000 MW (AREVA-Mitsubishi)

Demande de construction d'un réacteur Atmea en cours

projet de réacteur de faible puissance (EDF-Chine)

projet de réacteur de très faible puissance (50 à 250 MW) :

Projet FlexBlue (DCNS –EDF-CEA-AREVA)(sous marin)

2 Projets de réacteurs de 4^{ème} génération (CEA) :

réacteur rapide au sodium (ASTRID)

réacteur refroidi au gaz (ALLEGRO)

Durée de vie d'un réacteur (en France) :

Initialement : amortissement sur 30 ans

Prévisions actuelles :

- durée de 40 ans minimum (900MW)
- pour les plus récentes : 60 ans (1300, 1450 MW)

USA : la durée de vie de la moitié des réacteurs → 60 ans

Allemagne : +12 ans (*avant...*)

En France :

Tous les 10 ans : visite décennale qui autorise ou pas une prolongation de l'exploitation de 10 ans...

Durée de l'intervention : 4 mois



Auscultation de la cuve du réacteur par la "Machine d'Inspection en Service", un robot de 12 mètres de haut pour 12 tonnes d'acier qui s'affaira pendant une semaine de contrôle en 3x8.

2009 :

**Fessenheim1 (3VD)
Nogent1 (2VD)
Belleville2 (2VD)
Tricastin1 (2VD)
ChoozB2 (1VD)**

2010 :

**Fessenheim2 (3VD)
Nogent2 (2VD)
Bugey2 (2VD)
Belleville1 (2VD)
Chinon B4 (2VD)
Chooz B1 (1VD)**

2011 :

**Bugey3 (2VD)
Gravelines
Dampierre...
soit 10 réacteurs**

Fessenheim a été autorisée pour une durée de 10 ans de plus à condition d'effectuer des travaux supplémentaires vis-à-vis de la sécurité

Avantages de l'énergie nucléaire

- Unités de forte puissance (900 à 1600 MW)
- Forte disponibilité (80 à 90%)
- Coût peu élevé de production (<3 cts/kWh, 30€/MWh)
- Part du coût «combustible» faible
- Fiabilité et sécurité élevées par nécessité !
- Durée de vie importante (60 à 80 ans)
- Ressources en U (et Th) importantes (plusieurs milliers d'années)
- Peu d'émission de CO₂ et peu de déchets !

Inconvénients de l'énergie nucléaire

- Investissements élevés (EPR : 3,5 milliards d'euros)
- Unités de forte puissance (peu pratique pour certains pays)
- Energie considérée comme potentiellement à risque
- Génère des déchets fortement radioactifs à vie longue
- Forte hostilité d'une partie de l'opinion publique (en régression ?)

Le Conseil européen de l'Energie a décidé de classer l'énergie nucléaire comme une énergie contribuant à « décarboner » (donc « énergie verte » !)

L'échelle des événements nucléaires (INES)

Mise en place en 1991, utilisée internationalement pour caractériser les événements nucléaires en fonction de leur gravité et de leurs conséquences sur les populations et l'environnement (de 1 à 7)

- Impact sur la population et l'environnement
- Impact sur les installations
- Nature des défaillances de sécurité

Accident majeur

7

● **Rejet majeur de matières radioactives** avec des effets dangereux sur la santé et l'environnement.

Tchernobyl (1986)
(RBMK)(*)

Accident grave

6

● **Rejet important de matières radioactives**, application intégrale des contre-mesures prévues.

Fukushima (2011)
(BWR)

Accident ayant des conséquences étendues

5

● **Rejet limité de matières radioactives** avec mise en œuvre de contre-mesures prévues. **Plusieurs décès radio-induits.**
● **Endommagement grave du cœur du réacteur.**
● Rejet de grande quantité de matières radioactives, exposition importante des travailleurs.

Three Miles Island (1979)
(PWR)(*)

Accident ayant des conséquences locales

4

● **Rejet mineur de matières radioactives.**
● Au moins **un décès radio-induit.**
● Rejet important de matières radioactives, exposition importante des travailleurs.

Saint Laurent des Eaux
1969 (UNGG)
1980 (UNGG)

Incident grave

3

● Exposition à plus de 10 fois la limite autorisée (brûlures, etc...)
● Contamination d'une zone « protégée ».
● Accident évité de peu avec défaillance en matière de sûreté.

Incident

2

● Exposition d'un travailleur dépassant les limites annuelles.
● Contamination d'une installation dans une zone « protégée ».
● Défaillances importantes en matière de sûreté.

Anomalie

1

● Surexposition d'un travailleur dépassant les limites annuelles réglementaires.
● Problèmes mineurs liés aux composants de sûreté.

(*) description détaillée en fin d'exposé



28 mars 1979 : Three Mile Island

Réacteur à eau pressurisée PWR

1 – défaillance du système de refroidissement
(négligence de la maintenance)

2 – vanne fermée (oubli)

3 – mauvaise interprétation des signaux d’alerte

4 – fusion du cœur

pas de fuite radioactive à l’extérieure

28 avril 1986 : Tchernobyl (Ukraine)

Réacteur soviétique RBMK (eau légère, uranium enrichi, modérateur graphite)

1 – Test d’utilisation à faible puissance (normalement interdit !)

2 – réacteur instable à faible régime, risque d’emballement

3 – réactions tardives des opérateurs, mauvaises manœuvres ...

4 - arrêt du réacteur trop lent et emballement

5 – radiolyse : émission d’hydrogène

6 – explosion puis incendie du graphite

7 – sans enceinte de confinement, libération dans l’atmosphère d’une grande quantité de débris radioactifs



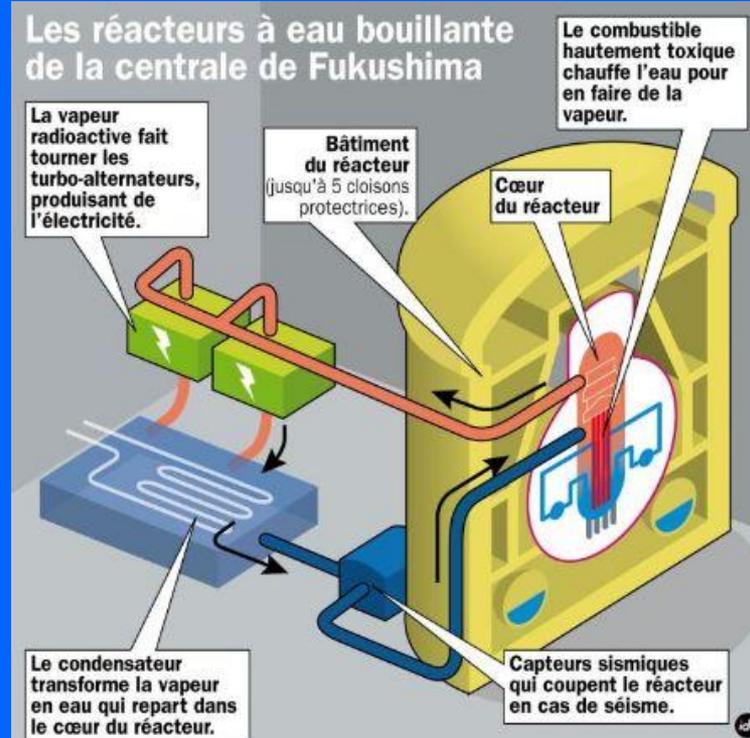


**14 mars 2011
Fukushima I (Daiichi)**

**6 réacteurs BWR
(à eau bouillante)**

- 1 : 439 MW (GE)(1970)
- 2 : 760 MW (GE-Toshiba)(1973)
- 3 : 760 MW (Toshiba)(1974)
- 4 : 760 MW (Hitachi)(1978)
- 5 : 760 MW (Toshiba)(1978)
- 6 : 1067 MW (GE-Toshiba)(1979)

GE : General Electric



**Fukushima II (Daini) :
4 de 1067 MW (Toshiba et Hitachi)
(1982 à 1987)**

Fukushima I (Daiichi)

Réacteurs 1, 2 et 3 :

Tsunami : arrêt des alimentations électriques et mise hors service des systèmes de refroidissement

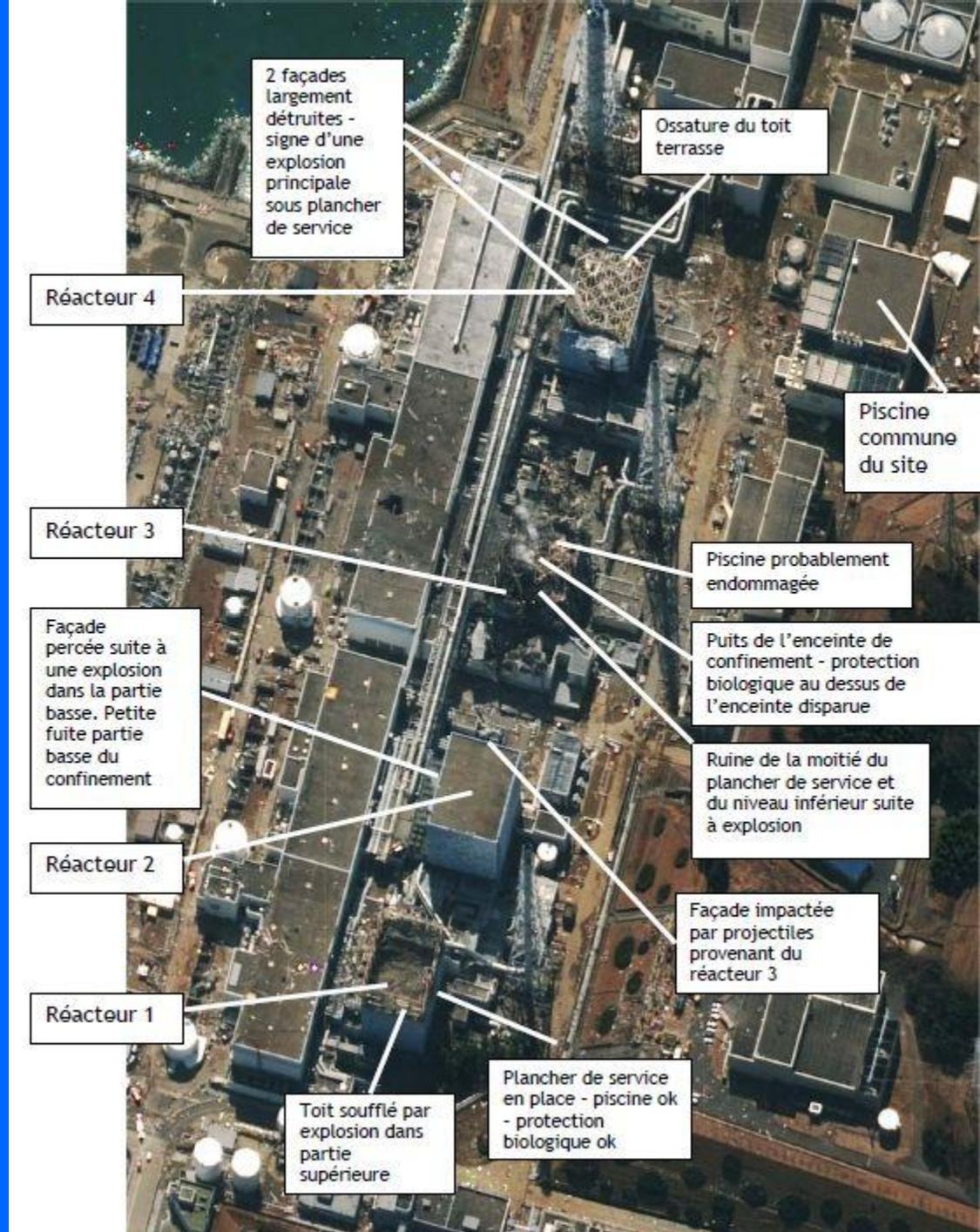
- dégradation du cœur (début de fusion)
- dégagement d'hydrogène
- dépressurisation de l'enceinte
- explosion de l'hydrogène
- mise hors eau des piscines de stockage

*Réacteur 4 : pas de combustible
problème au niveau de la piscine
de stockage des combustibles usés*

*Les réacteurs 5 et 6 en arrêt,
cœurs correctement refroidis*

Fukushima II (Daini)

*Centrale plus récente :
n'a subi aucun dommage bien que
soumise aux mêmes tsunami !
réacteurs 1,2,3 et 4 en conditions
d'arrêts normales (« à froid »)
pas de dégradation de combustible*





Mise en place le 30 avril 2011, cette toute nouvelle carte de la sismicité en France présente les zones où le risque de survenue d'un séisme est le plus fort. En métropole, celles-ci se situent dans le sud de l'Alsace, au niveau du fossé Rhénan, des Pyrénées et des Alpes. Sept installations nucléaires sur 21 en activité en France se situent dans des régions où l'aléa sismique est modéré.

Pour chaque installation on a recherché quel a été le plus fort séisme au voisinage de la future centrale et on a majoré d'un 1/2 point de magnitude pour obtenir le « séisme majoré de sécurité ».

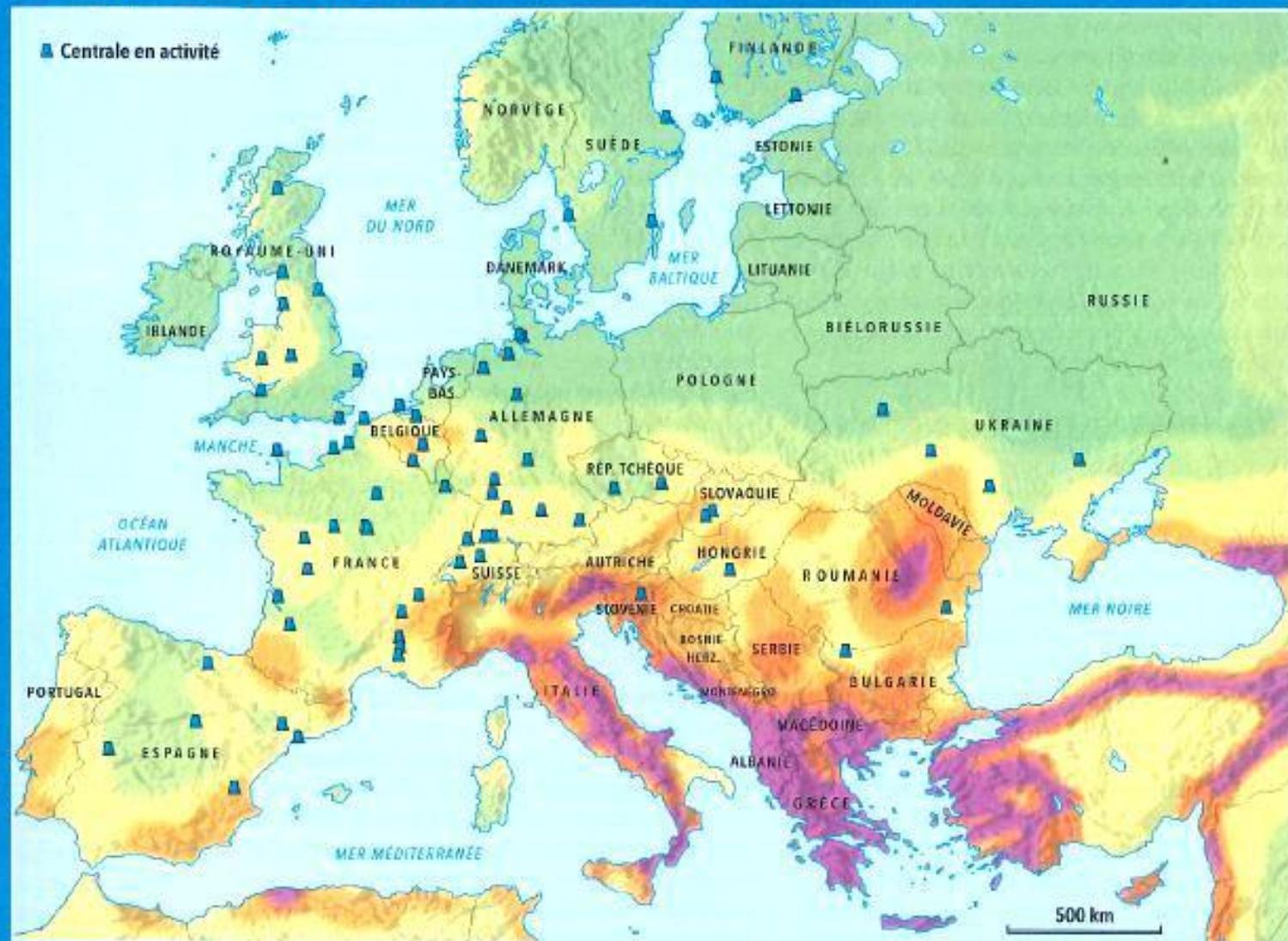
Les experts calculent l'amplitude de vibration que produirait ce séisme et les effets d'amplification locale liés à la nature du sol. Ces paramètres servent à définir les caractéristiques antisismiques de la future installation. Ces calculs sont menés en parallèle par EDF et l'IRSN.

Le plus fort séisme a été celui de Bâle en 1356, d'amplitude estimée à 6,2 Fessenheim a été conçue pour résister à un séisme de 6,7.

Risques sismiques		Installations nucléaires de base		Autres installations nucléaires	
Aléa	Mouvement du sol	REP	RNR	REP en construction	REP en démantèlement
Très faible	accélération < 0,7 m/s ²	réacteur à eau sous pression	réacteur à neutrons rapides		
Faible	0,7 m/s ² ≤ accélération < 1,1 m/s ²				
Modérée	1,1 m/s ² ≤ accélération < 1,6 m/s ²				
Moyen	1,6 m/s ² ≤ accélération < 3 m/s ²				
Fort	3 m/s ² ≤ accélération				
		réacteur à graphite/gaz ou gaz/eau lourde en démantèlement		Usine du cycle de combustible (enrichissement, fabrication, retraitement)	Stockage des déchets
				Centre d'études et de recherche	Abelès, laboratoire

Question : quel a été réellement l'amplitude de ce séisme ? 6,2 ou 6,7 à 7,1 selon certains experts ?

LES CENTRALES EUROPÉENNES



SOURCE : EUROPEAN SEISMOLOGICAL COMMISSION - © LÉGENDES CARTOGRAPHIQUES

Risques sismiques

probabilité de 10% que l'accélération du sol dépasse le seuil maximum en 50 ans (unités : g)

0 0,02 0,05 0,1 0,2 0,3

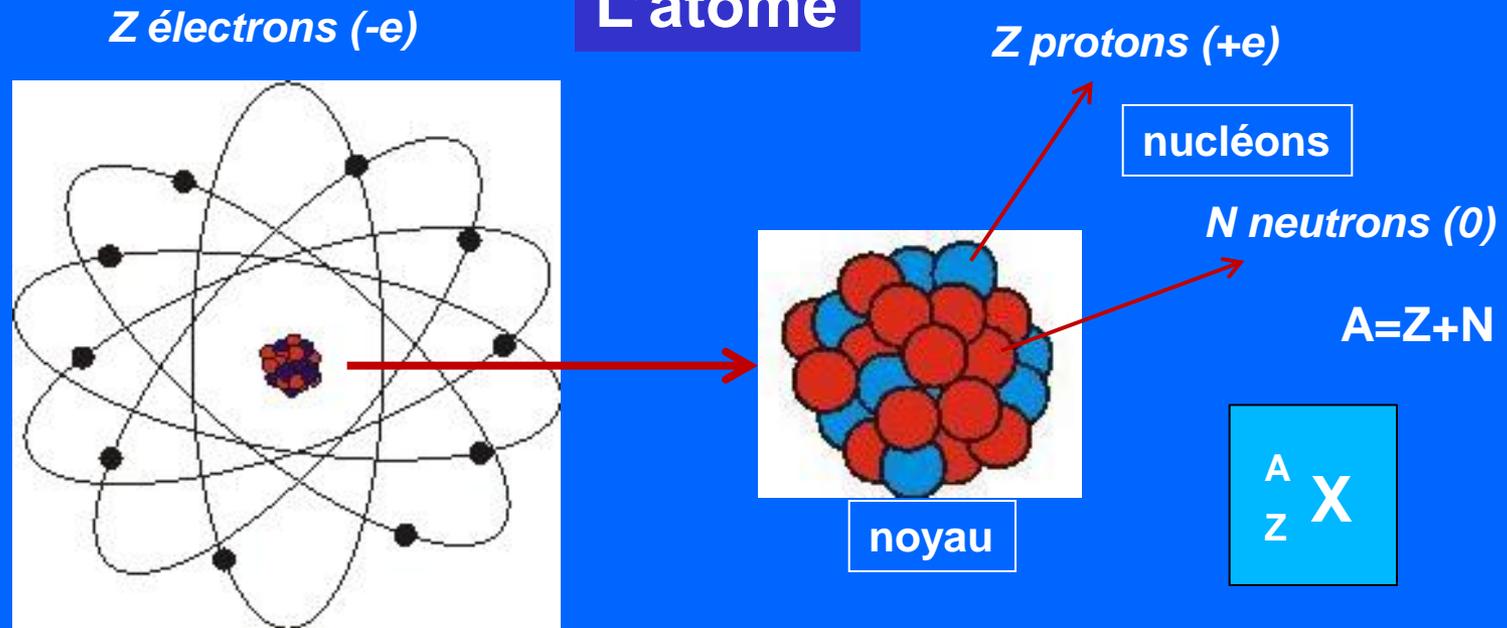
Risque faible → Moyen → Fort

Le parc nucléaire européen est, plus encore que le parc français, exposé au risque sismique : deux centrales dans l'ouest de l'Allemagne, deux centrales en Suisse, les centrales slovène et roumaine sont implantées dans des zones sismiques. Cette sismicité résulte, comme celle qui affecte la France, du lent rapprochement des plaques africaine et européenne.

L'énergie nucléaire

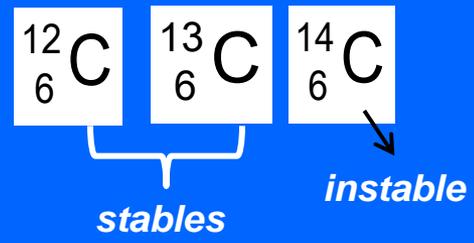
*Quelques rappels (élémentaire !)
de physique nucléaire...*

L'atome

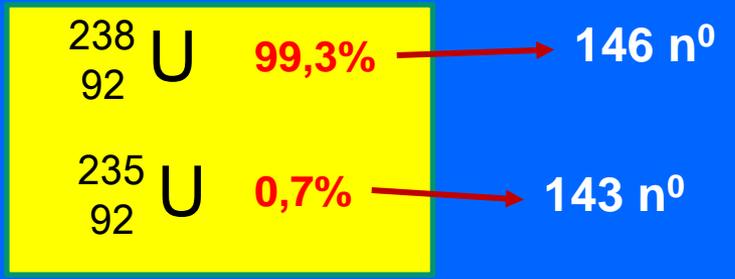


- Le nombre de protons (= nombre d'électrons) détermine la nature chimique de l'élément
 Carbone : 6, Oxygène : 8, Fer : 26, Uranium : 92...

- Le nombre de neutrons est variable (« isotopes »), permet de stabiliser le noyau
 mais peut aussi rendre le noyau instable si très différent du nombre de protons
 (noyau radioactif)



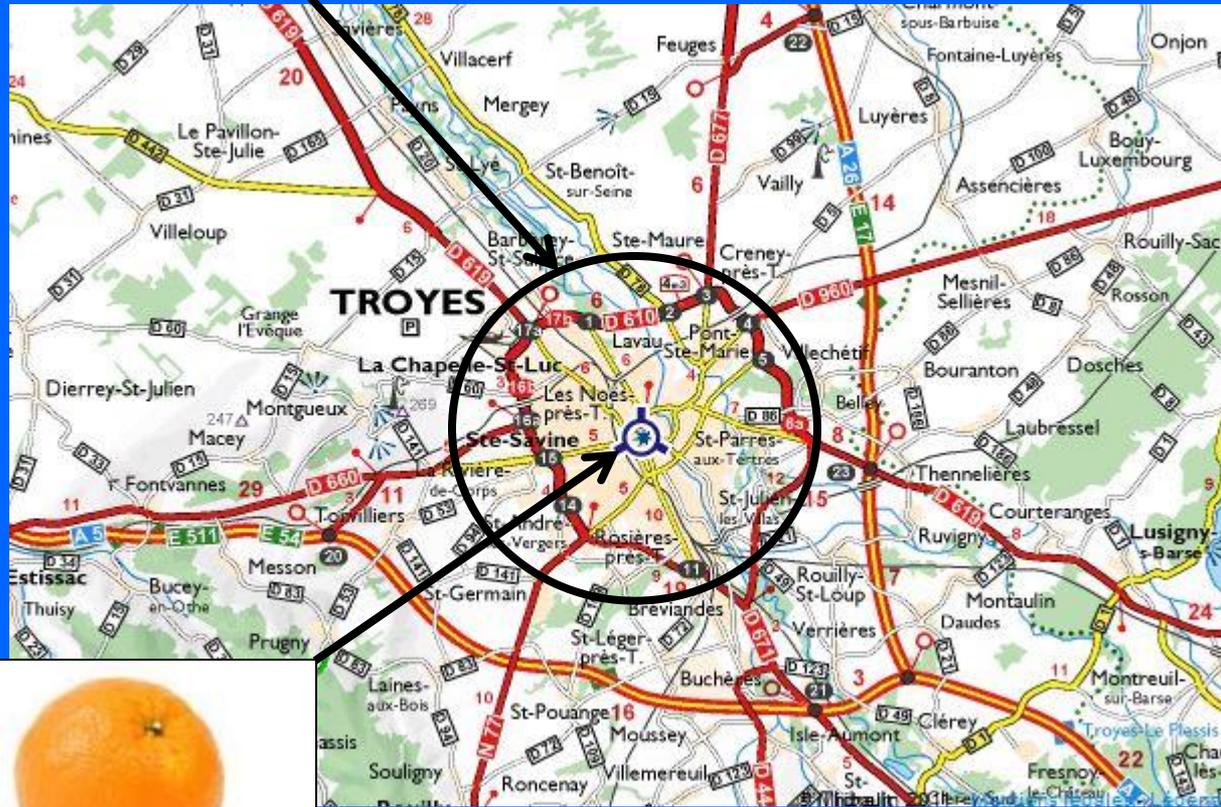
Isotopes naturels
de l'uranium



L'atome d'hydrogène

l'électron

« pépin »



noyau

*1/100.000 du diamètre
de l'atome*

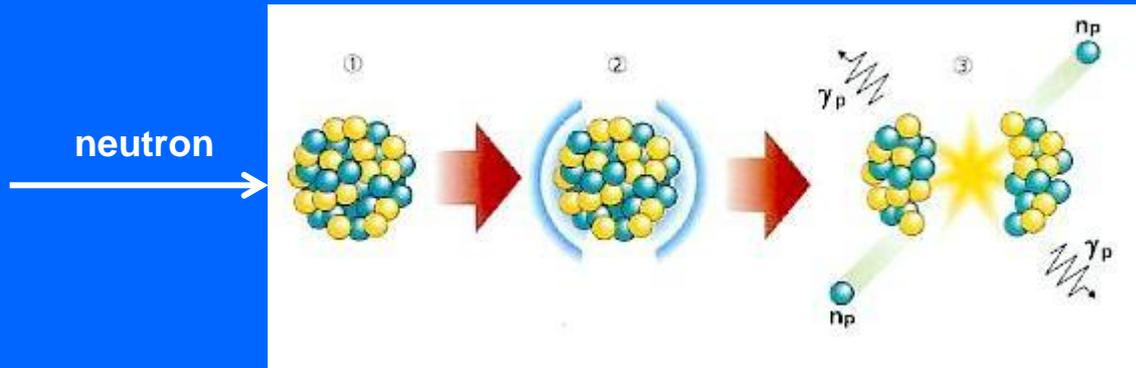
1 mm



*10 millions d'atomes
1.000 milliards de noyaux !*

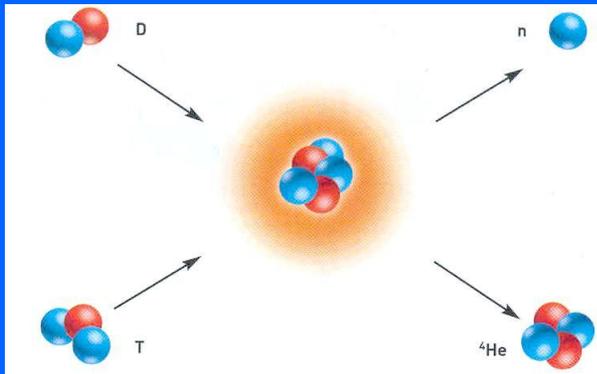
Noyaux lourds : Fission

L'énergie nucléaire



réacteurs nucléaires
bombe « atomique »

Noyaux légers : Fusion

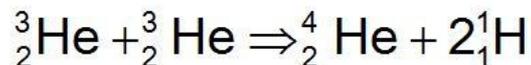
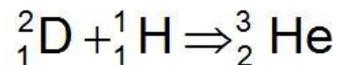
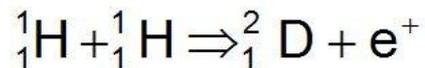


17,6 MeV

¹H, ²D, ³T, ⁴He, ⁶Li ... ¹²C ...

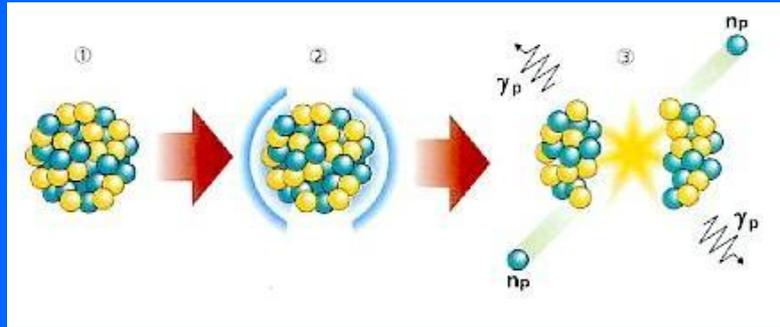
Soleil, bombe H, réacteurs futurs ?

Soleil :



A chaque seconde, le Soleil convertit 700 millions de tonnes d'hydrogène en hélium et 4 millions de tonnes en énergie pure ! (15 millions de °C)

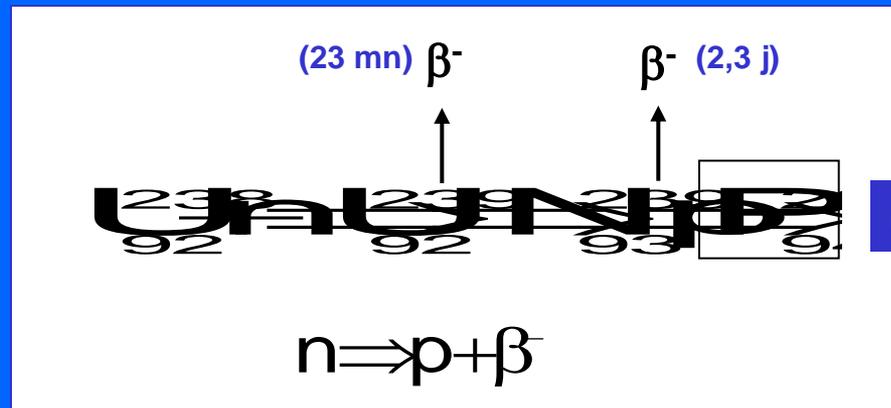
élément fissile : qui subit la fission par capture d'un neutron



U²³⁵, U²³³, Pu²³⁹, Pu²⁴¹

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

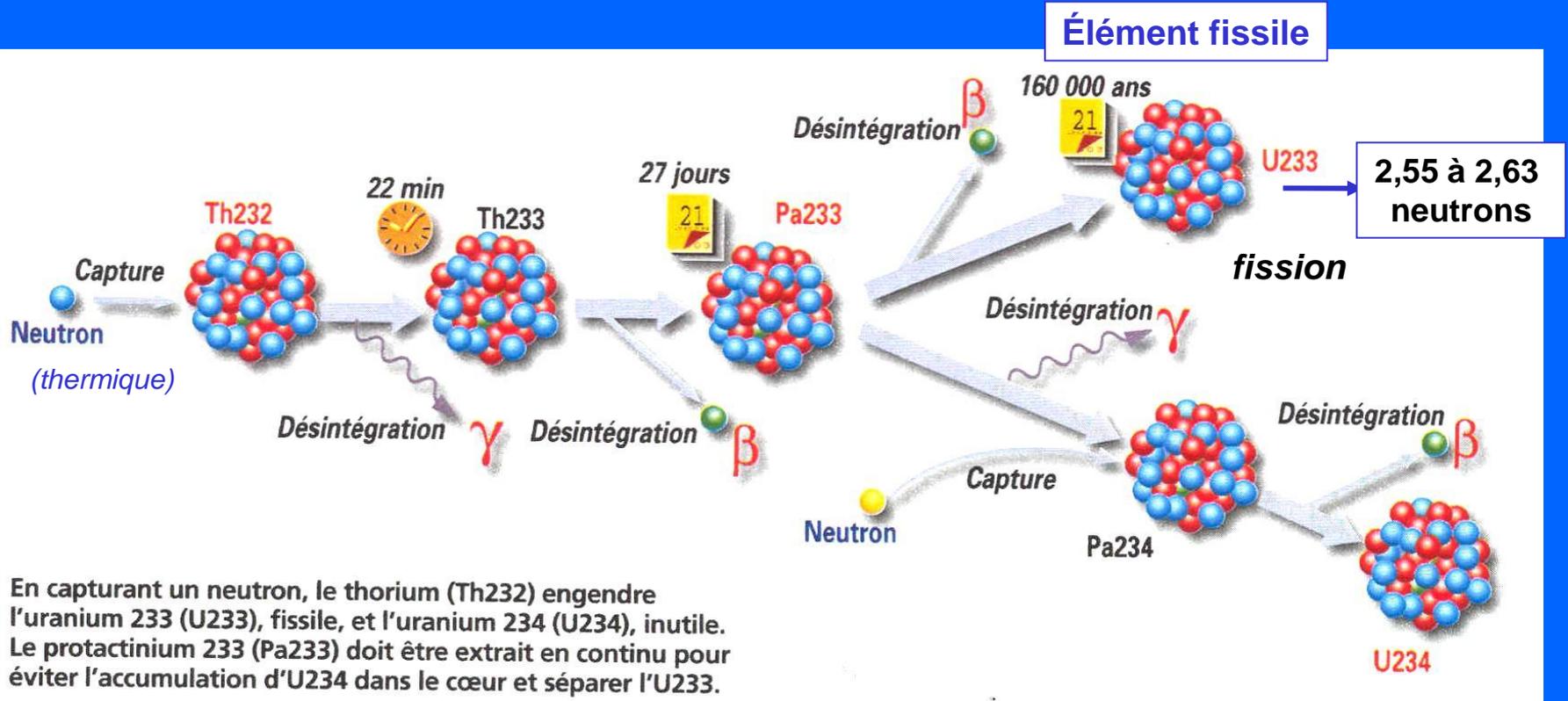
élément fertile : qui se transmute en un élément fissile par capture d'un neutron



(24 000 ans)

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

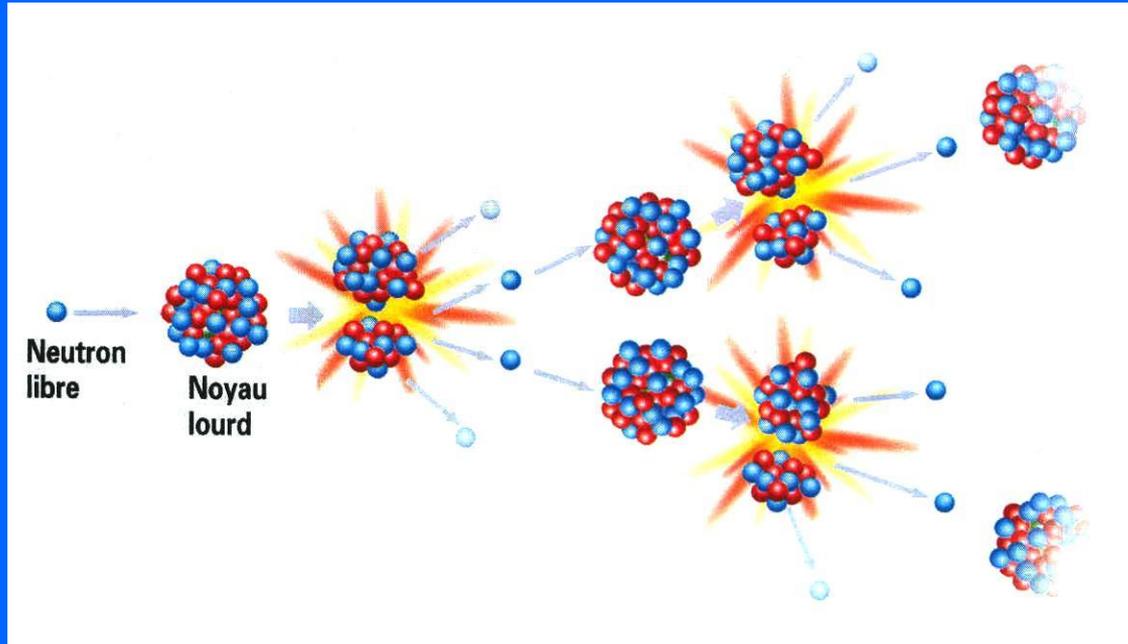
Autre exemple de capture fertile (à grand avenir !) : le thorium



Intérêt :

- le thorium est beaucoup plus abondant que l'uranium (x4 à 10)
- l'isotope Th^{232} représente 100% (l' U^{235} : 0,7%)

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



Dans un réacteur nucléaire on cherche à obtenir une seule fission à chaque étape en contrôlant le nombre de neutron efficace...

*La durée entre 2 fissions est de l'ordre de la milliardième de seconde (10^{-9} sec)...
Avec une moyenne de 2,56 neutrons libérés à chaque fission, au bout de 65 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
- $2 \cdot 10^4$ tep
- 200 000 tonnes de TNT

Bombe A :

^{235}U : 2,56 neutrons	→	10 à 15 kg
^{239}Pu : 3,01 neutrons	→	5 kg

La radioactivité

Des noyaux instables tentent de devenir stable en modifiant leur structure (« désintégration ») :

- soit très fortement en émettant un noyau d'hélium (2 protons 2 neutrons)
⇒ *désintégration α*

- soit en transformant un proton en neutron avec émission d'un électron ou l'inverse
⇒ *désintégration β*

Généralement elles sont accompagnées de l'émission d'une onde électromagnétique de très haute énergie

⇒ *rayonnement γ*

Un élément radioactif est caractérisé par sa période :
temps au bout duquel la moitié des atomes se sont désintégrés...

O^{16} : 2 minutes - I^{131} : 8 jours – Sr^{90} : 29 ans – Cs^{137} : 30 ans
 C^{14} : 5730 ans – U^{235} : 700 millions d'ans – U^{238} : 4,5 milliards d'ans...

Les unités utilisées en radioactivité :

1 – Pour l'activité : le becquerel (Bq)

très faible... une désintégration par seconde...

lait, viande, légumes... 100 Bq/kg

organisme humain : 8000 à 12000 Bq (C¹⁴, K⁴⁰)

2 – Les effets sur l'organisme : le Sievert (Sv)

Dose maximale admissible réglementaire : 20 mSv/an

moins de 50mSv ????

50mSv : risque de cancer chez l'enfant

100mSv : risque de cancer chez l'adulte

500mSv : nausées, vomissements

1 Sv : mal des rayons (perte de cheveux...)

2 Sv : 10% mortalité dans les mois qui suivent

5 Sv : dose semi-létale (mortalité dans 50%)

6 Sv : troubles sanguins

7 Sv : 90% mortalité dans les mois qui suivent

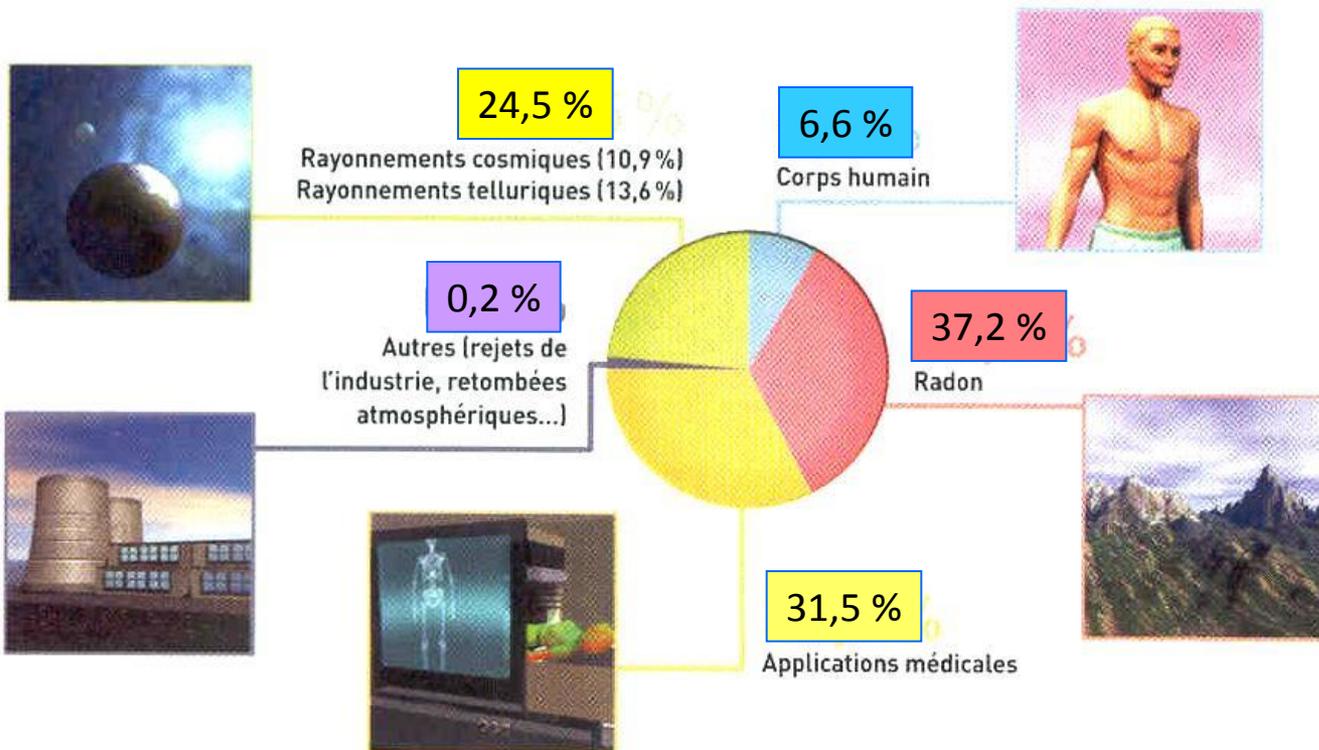
10 Sv : dose létale (quelques mois)

100 Sv : mortalité en quelques heures

1000 Sv : mortalité en quelques minutes

**Effets
d'une
irradiation**

Les sources de radioactivité en France (source CEA/IRSN)



Irradiation naturelle moyenne en France : 2,38 mSv/an
Irradiation artificielle moyenne en France : 1,11 mSv/an

3,50 mSv/an

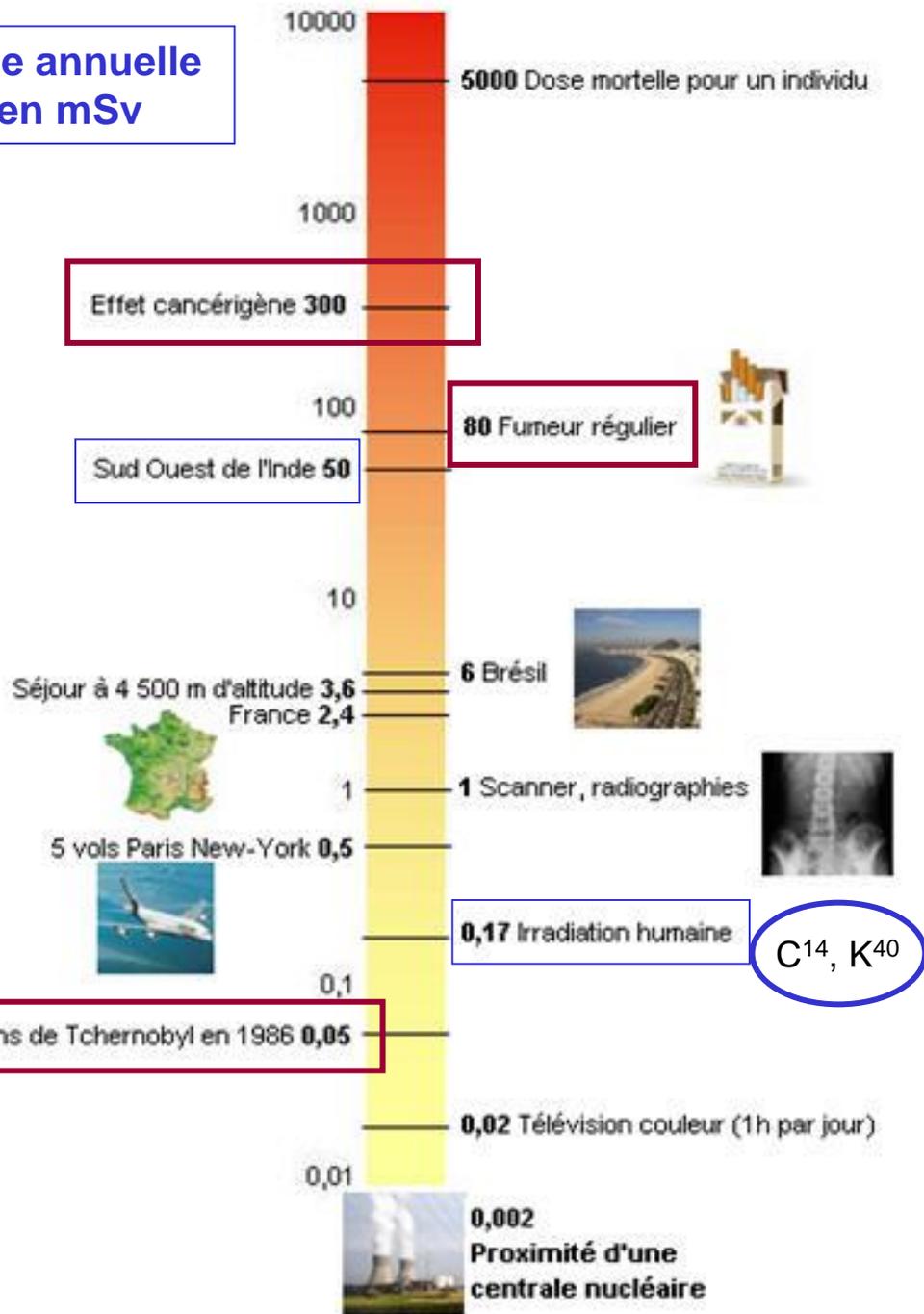
exemples :

examen radiologique : 0,6 mSv

examen au scanner : 10 mSv

Scintigraphie : 20 mSv

Dose annuelle en mSv



Irradiation naturelle annuelle moyenne en France : 2,4 mSv

**Brésil : 6 à 175 mSv
Kerala (Inde) : 50 mSv
Iran : 400 mSv**

Dosimétrie personnel de bord d'un avion : 2,5 à 6,5 mSv/an

Montres à cadran lumineux : 0,005 à 0,1 mSv/an

Contamination radioactive, irradiation, activation...

1 – Contamination : être en contact avec une substance radioactive

externe : souvent peu dangereuse...
(selon l'intensité radioactive et la nature du rayonnement)

décontamination par douche

interne : par absorption ou inhalation

peut être inoffensive (C^{14} , K^{40} ...)
risques chimiques (U, Pu...)

peut être très dangereuse (α)

2 – Irradiation : être soumis à un rayonnement ionisant

selon la dose reçue et la nature du rayonnement, peut être fatal

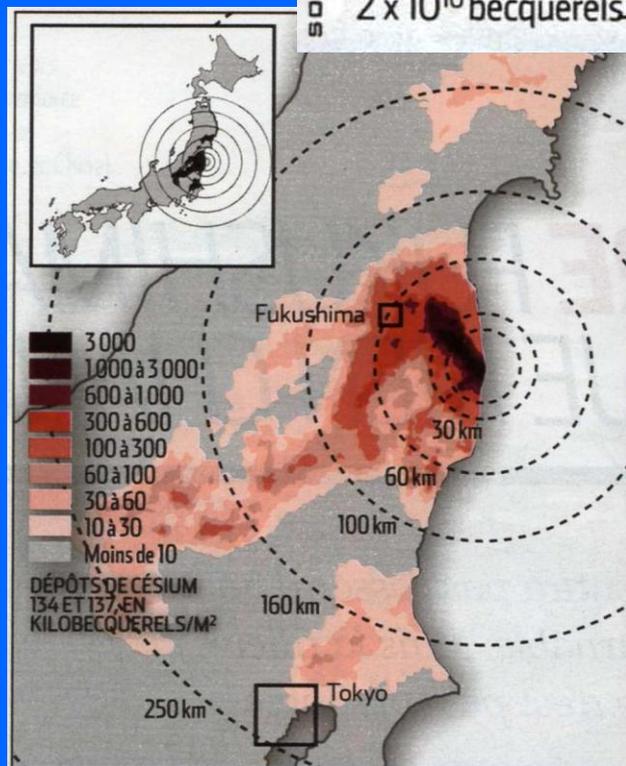
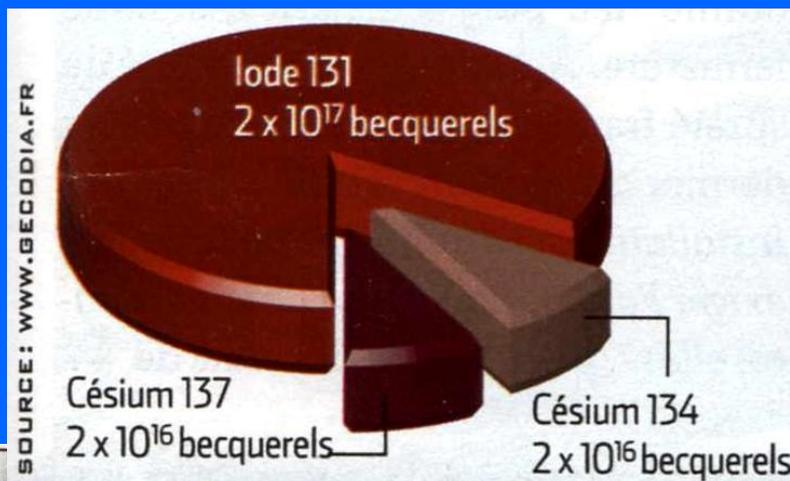
! être irradié ne signifie pas devenir radioactif soi-même

3 - activation

Rendre un matériaux radioactif principalement par bombardement neutronique

ne concerne pas la matière organique (rayons cosmiques $\rightarrow C^{14}$)

Les conséquences sanitaires de l'accident de Fukushima

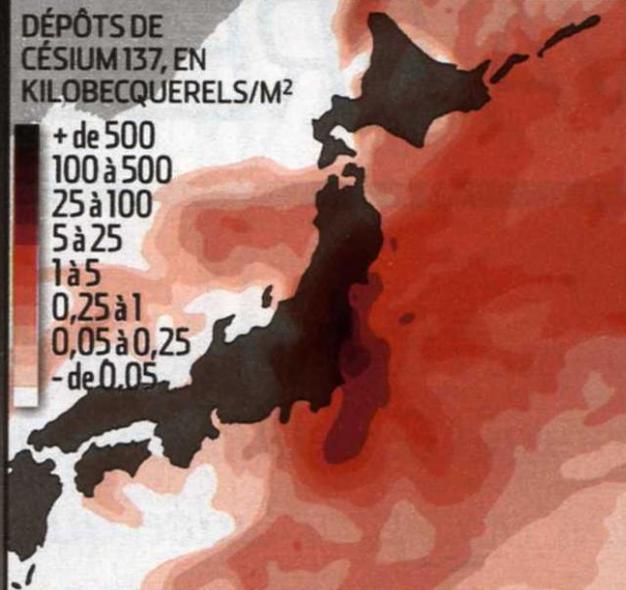


période :
 ^{131}I : 8 jours
 ^{137}Cs : 30 ans
 ^{134}Cs : 2 ans

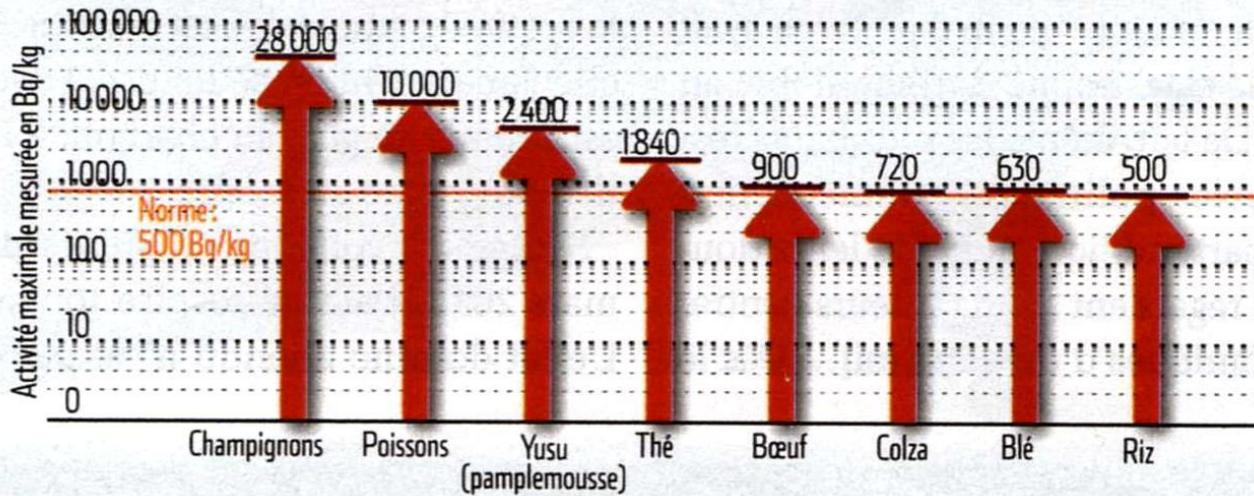
période effective
(biologique) :
 ^{131}I : 7,6 jours
 ^{137}Cs , ^{134}Cs : 70 jours

... mais 80 % de la radioactivité est tombée dans l'océan

L'essentiel des éléments radioactifs a fini dans le Pacifique, mais du fait de la dilution, leur impact devrait être limité. Il pourrait être plus important sur le littoral proche de la centrale, l'eau hautement contaminée ayant fui vers la mer.



Radioactivité maximale constatée sur certains aliments

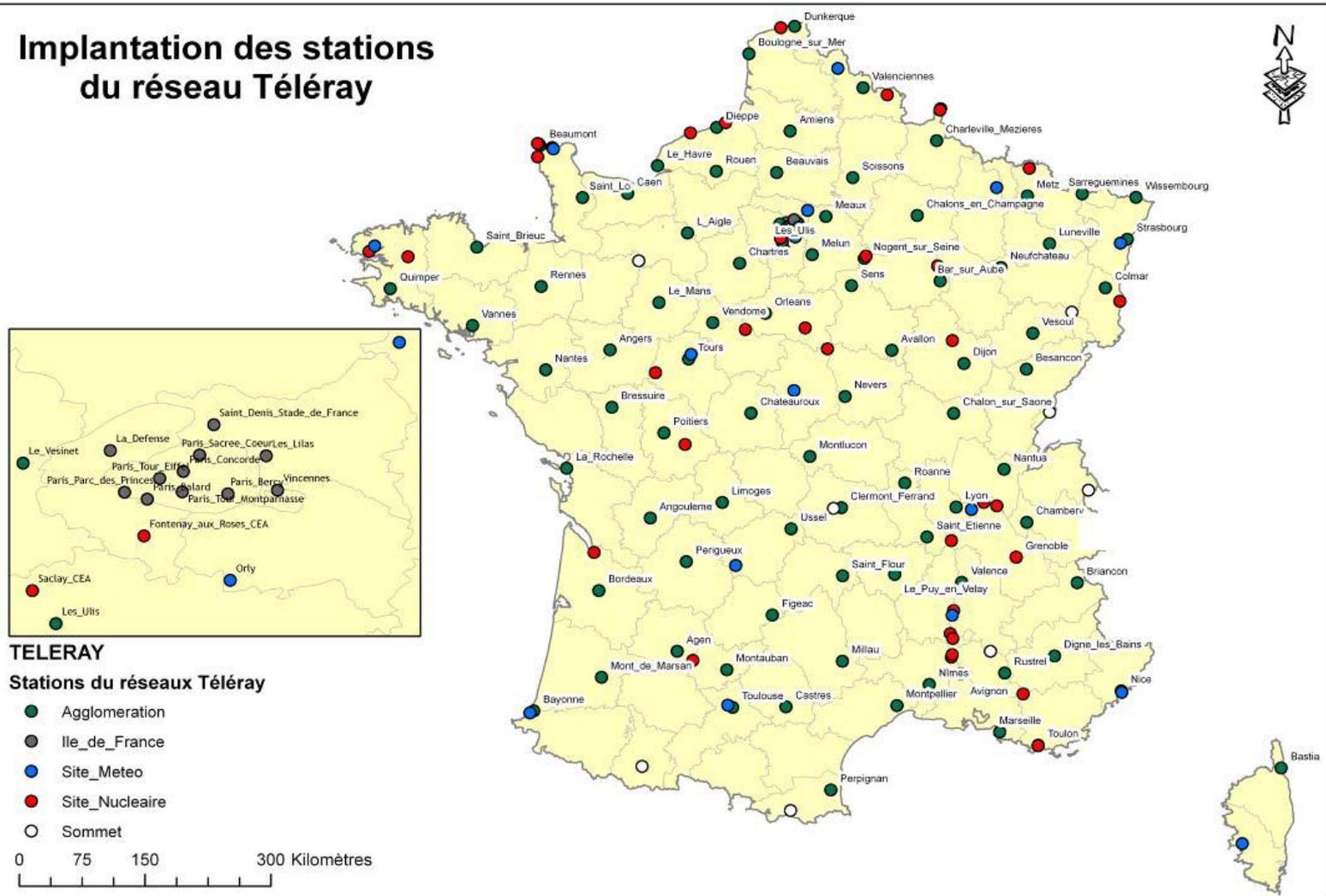


Les seules données dont on dispose concernent un échantillon limité. Elles semblent indiquer une faible exposition de la population à la radioactivité externe (hors consommation d'aliments contaminés). Quant aux ouvriers de la centrale, des milliers ont reçu des doses bien plus élevées.



Réseau de surveillance « TELERAY » de la radioactivité atmosphérique de l'IRSN

Implantation des stations du réseau Télecray

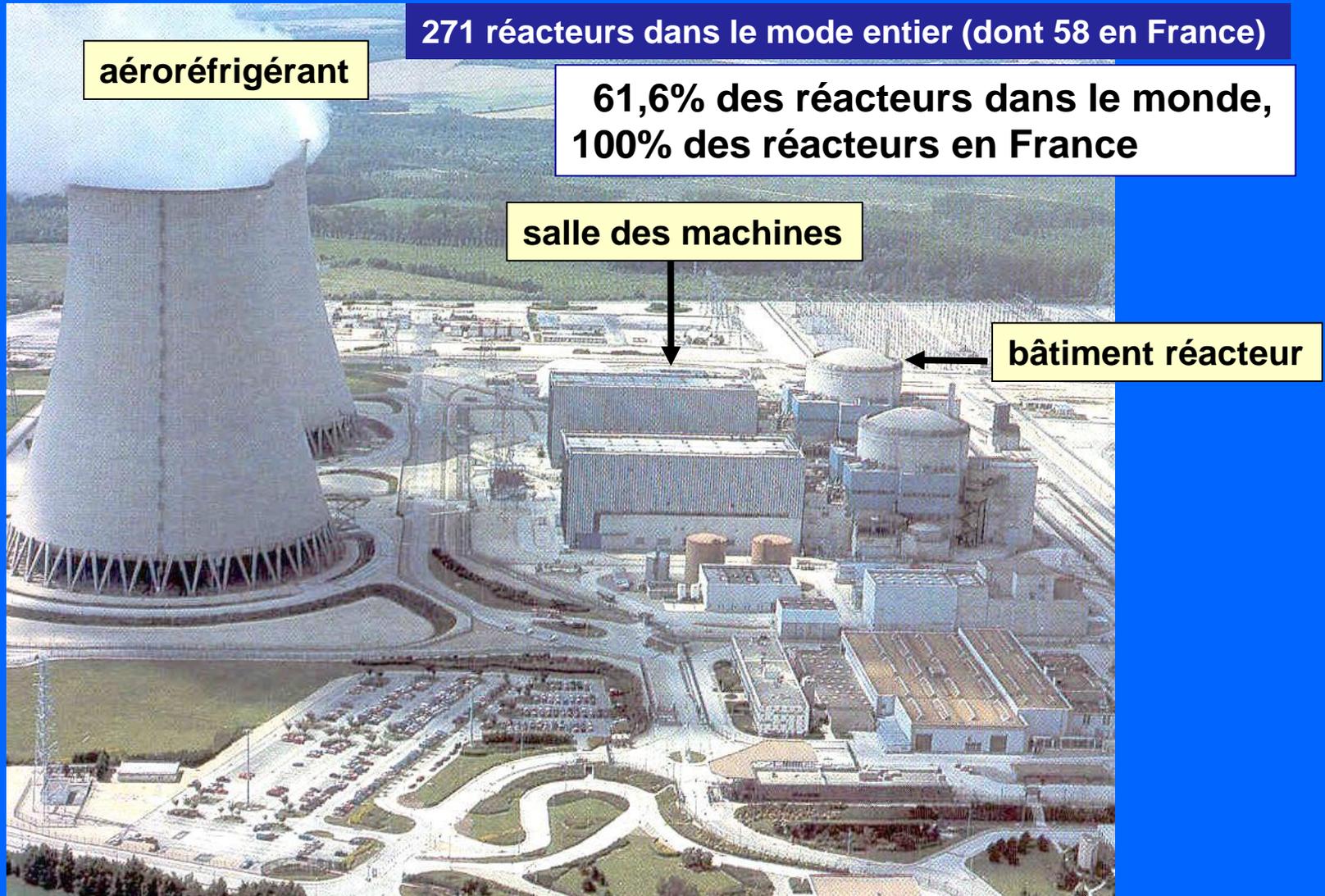


163 balises (qui réalisent 19 millions de mesures par an) + un réseau de prélèvement de poussières.

Les réacteurs nucléaires à eau légère pressurisée et à uranium enrichi (REP ou PWR)

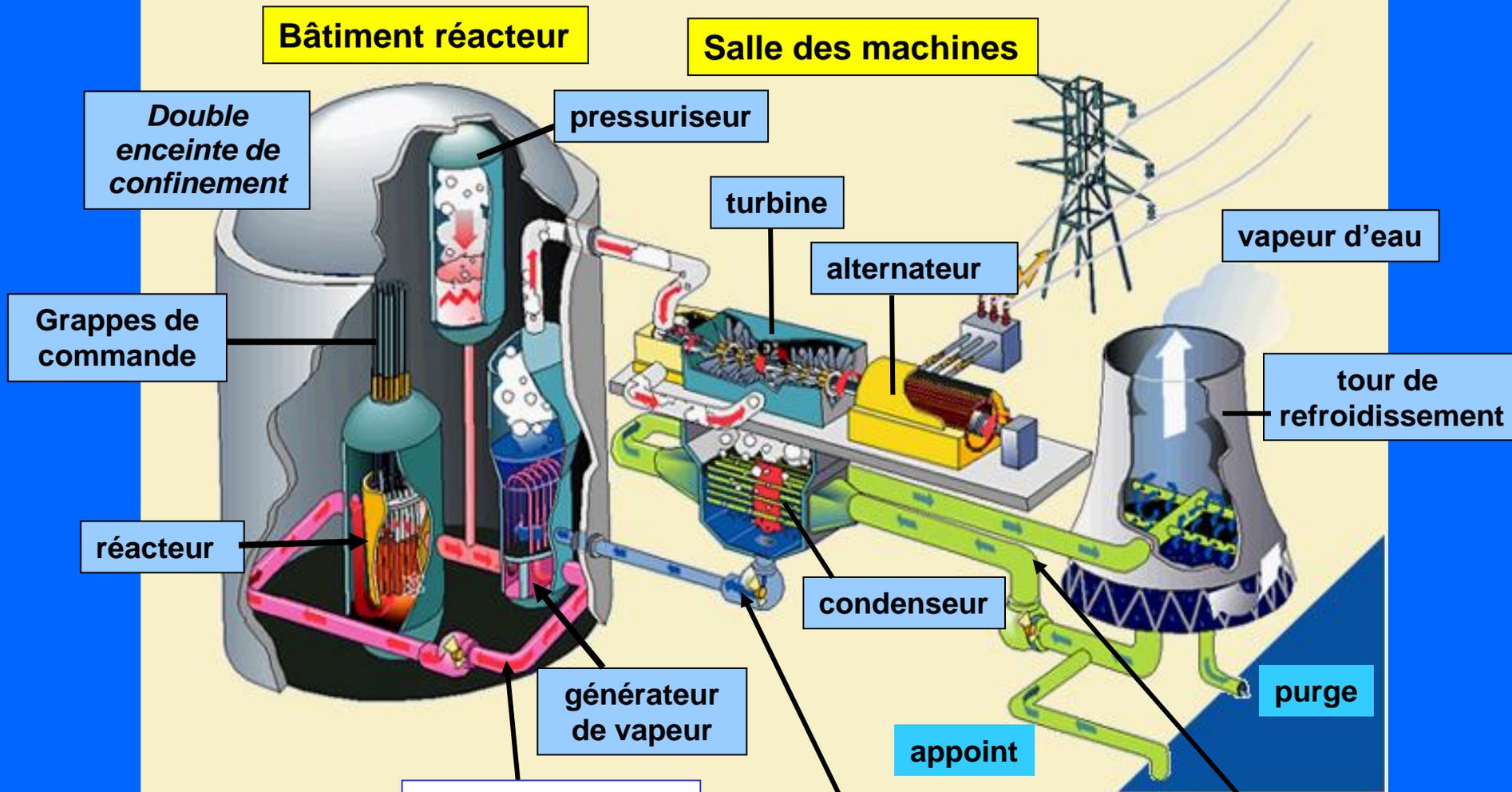
- *Principe de fonctionnement*

Les centrales nucléaires à eau légères pressurisée



**Centrale de Nogent sur Seine (2 x 1300 MW) - production : 20 TWh/an
(4% de la consommation nationale, 25% de la région parisienne)**

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



3 circuits d'eau indépendants

Circuit primaire :
eau sous pression
 $293^{\circ}\text{C} \rightarrow 328^{\circ}\text{C}$
155 bar
16 000 m³/h
(total : 64 000m³/h)

Circuit secondaire :
eau-vapeur
 $238^{\circ}\text{C} \rightarrow 288^{\circ}\text{C}$
71 bar
7800 t/h (vapeur)

Circuit « condenseur »
eau de refroidissement
du condenseur

Le Circuit primaire

les barres de contrôle

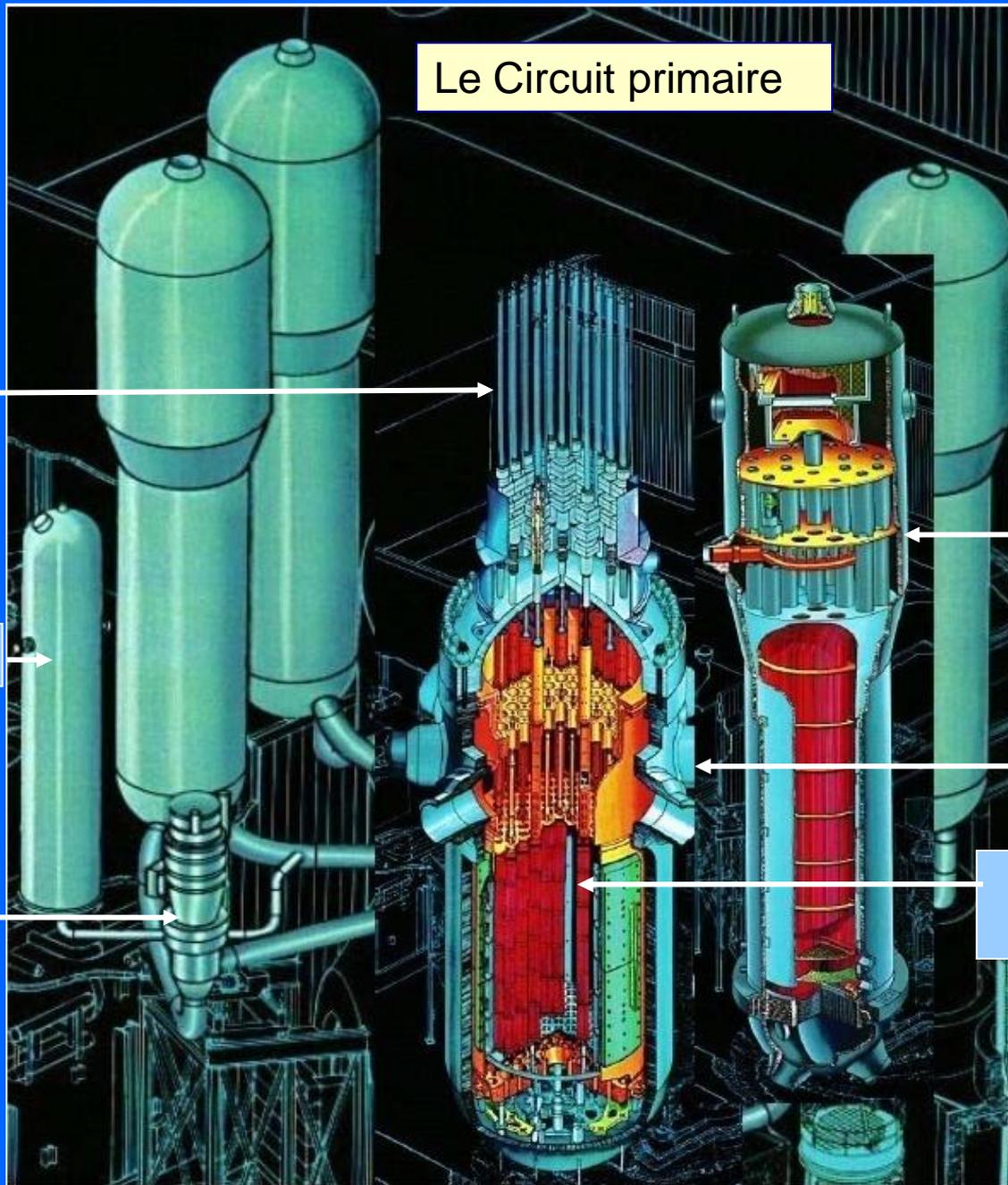
le pressuriseur

la pompe primaire
(6,5 GW)

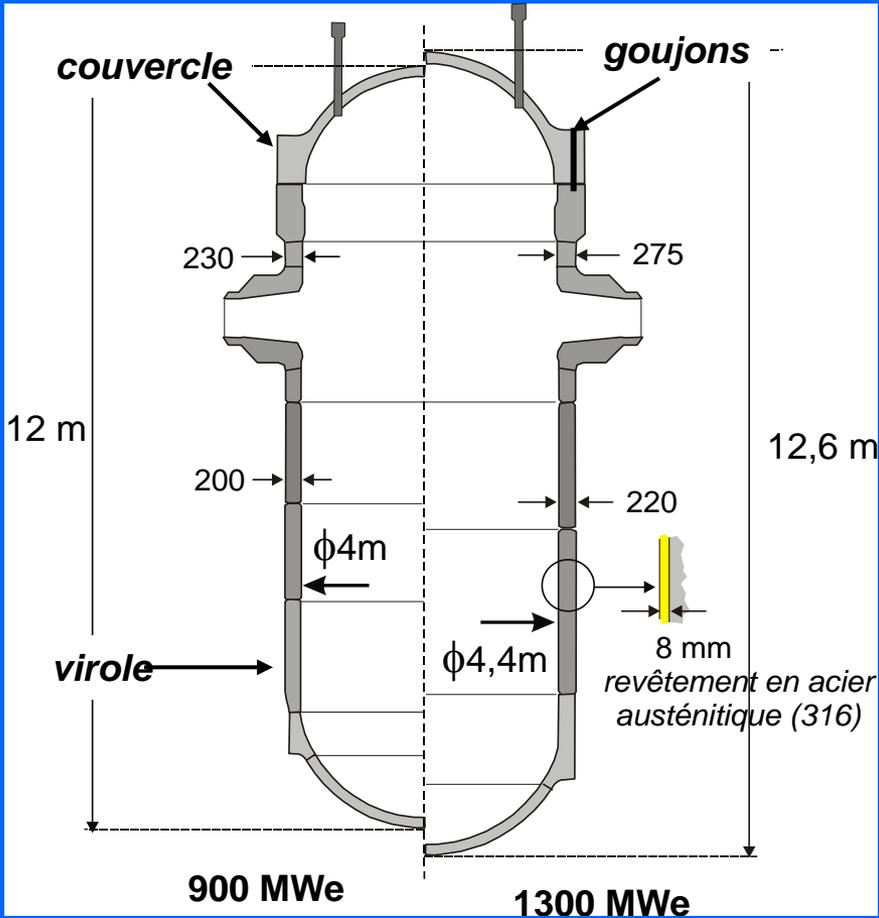
Le générateur de vapeur

La cuve

Les éléments combustibles

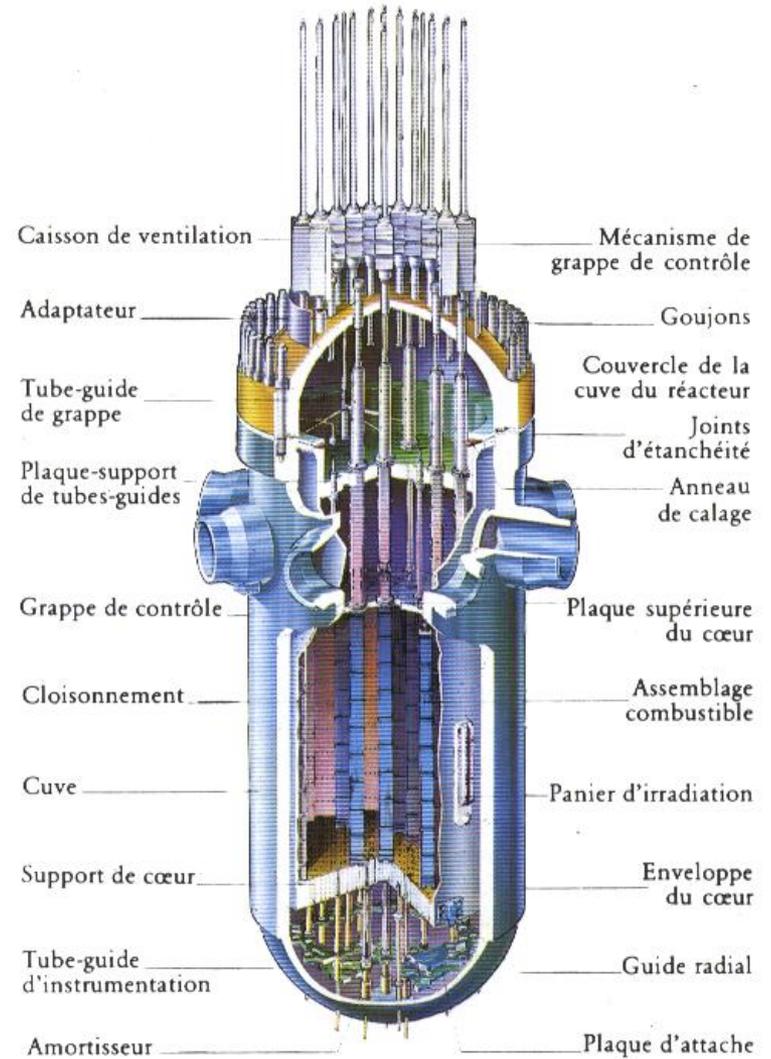


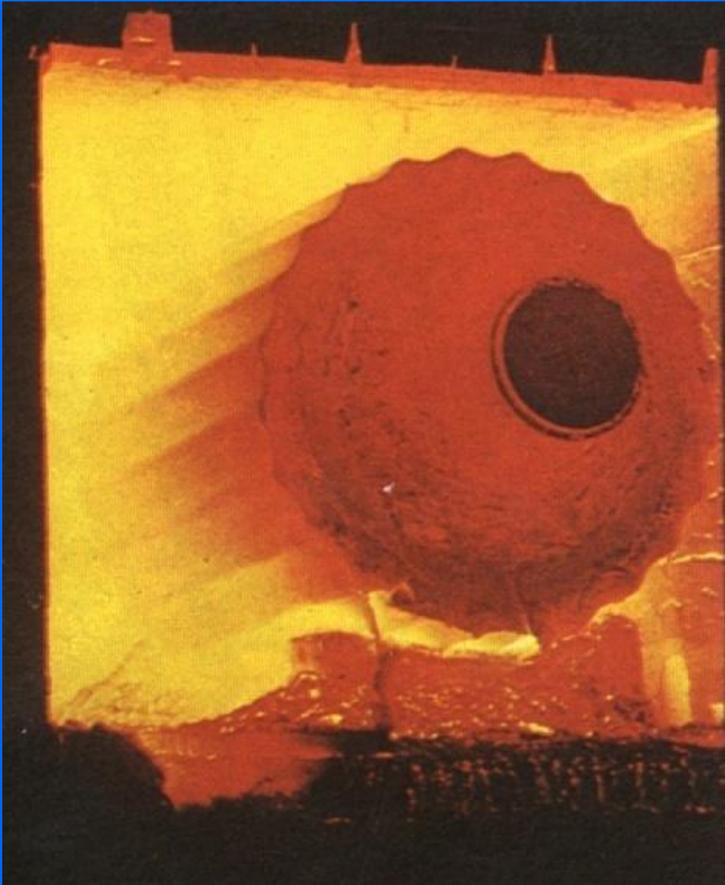
I - La cuve



Poids :	900MW	1300MW
- cuve seule	260t	318t
- couvercle	54t	76t
- goujons et écrous	15,4t	24t

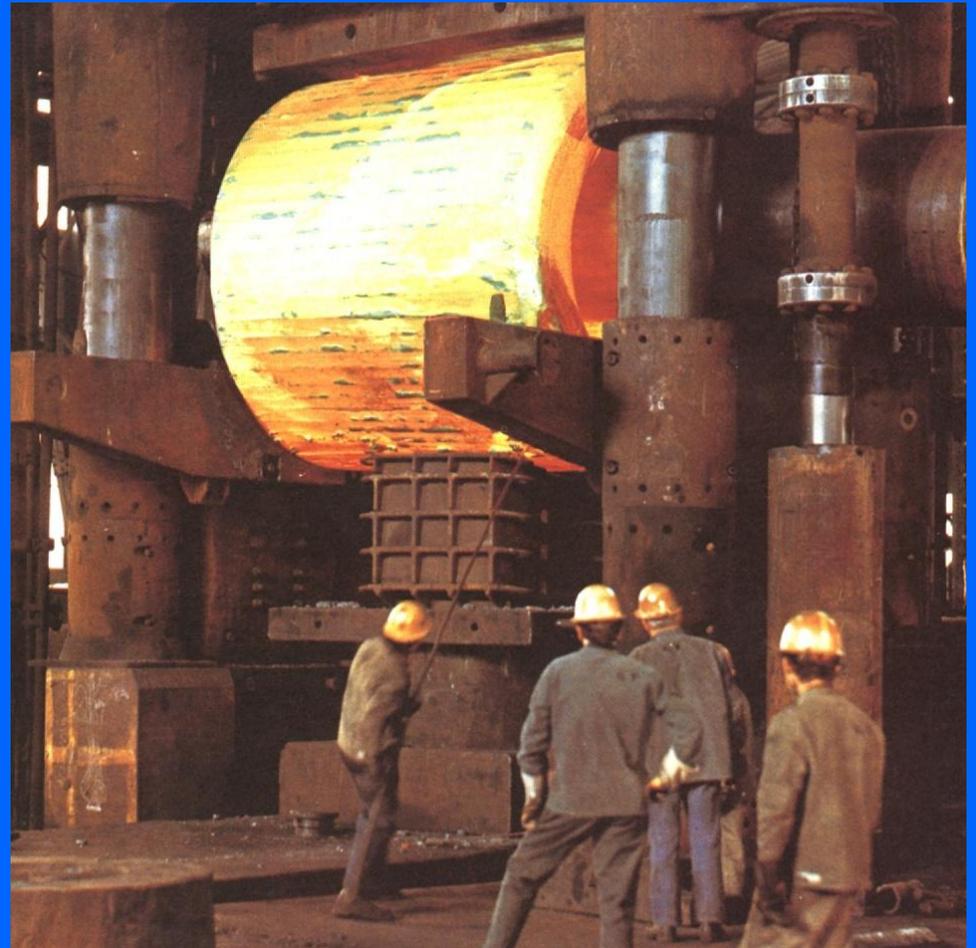
CUVE DU RÉACTEUR



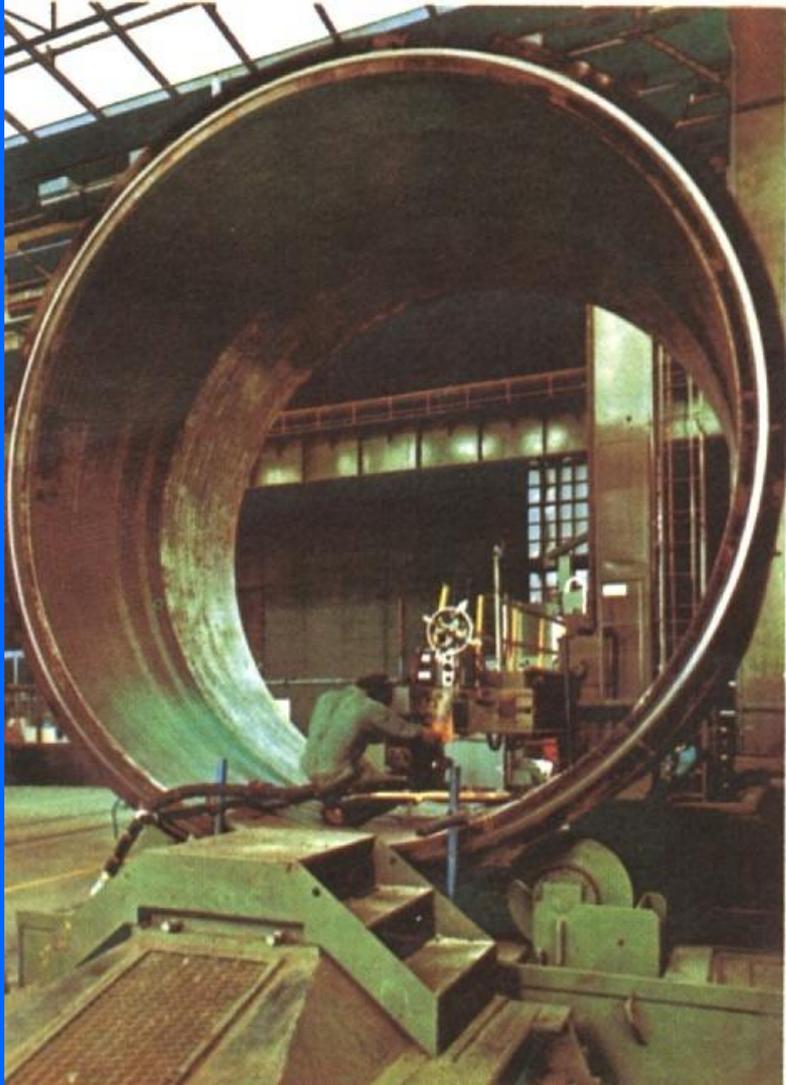


*Lingot de virole au cours
de réchauffage avant forgeage*

Fabrication d'une cuve



Forgeage à la presse d'une virole
Après forgeage à chaud du lingot, on enlève la partie centrale
puis on l'amène au diamètre et à l'épaisseur désirée par
écrasement à chaud sur un mandrin (« bigornage »)
La longueur de la pièce n'est pas modifiée



Pour éviter la corrosion, elle est revêtue intérieurement de 2 dépôts en acier inoxydable austénitique de 8mm d'épaisseur (dépôt par fusion)

1^{ère} couche : 24%Cr – 12%Ni

2^{ème} couche : 304L – 316L (18%Cr – 12%Ni)

**Revêtement interne d'une virole
par d'un dépôt d'acier inoxydable
(par fusion)**

Sous l'effet du bombardement neutronique, l'acier de la cuve se fragilise.

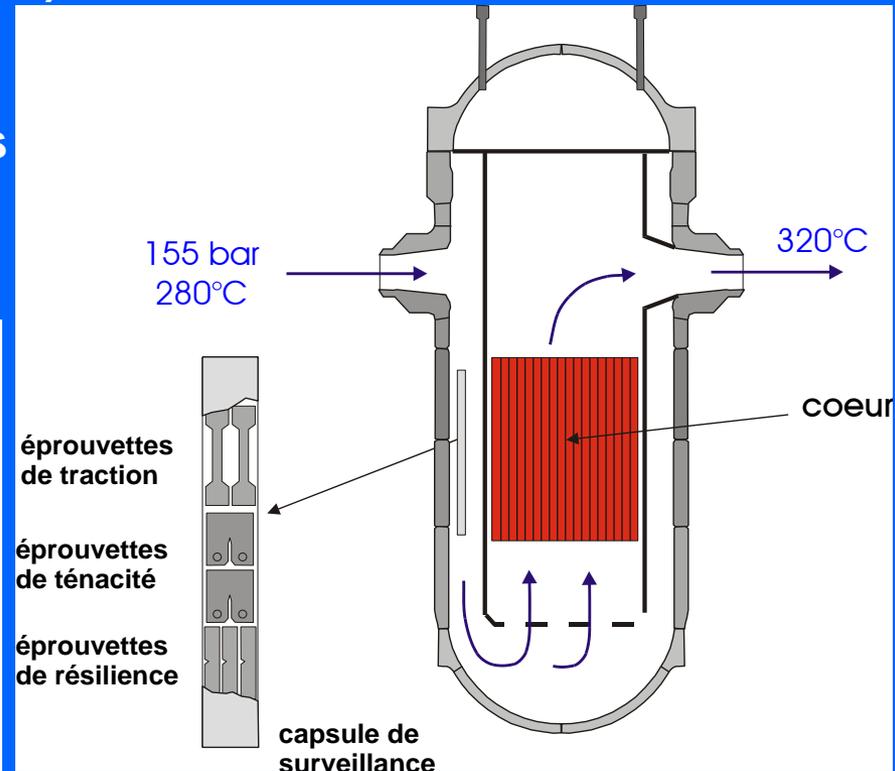
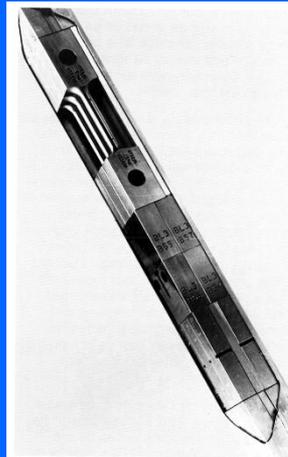
Afin de contrôler son évolution, en France et aux USA on a mis en place un « programme de surveillance »

À l'intérieur de la cuve, on a disposé 8 paniers contenant des éprouvettes de traction, de ténacité et de résilience qui sont irradiées 3 fois plus rapidement que la cuve et qui sont représentatives des différents constituants de la cuve (acier de cuve, la ZAT et des joints soudés).

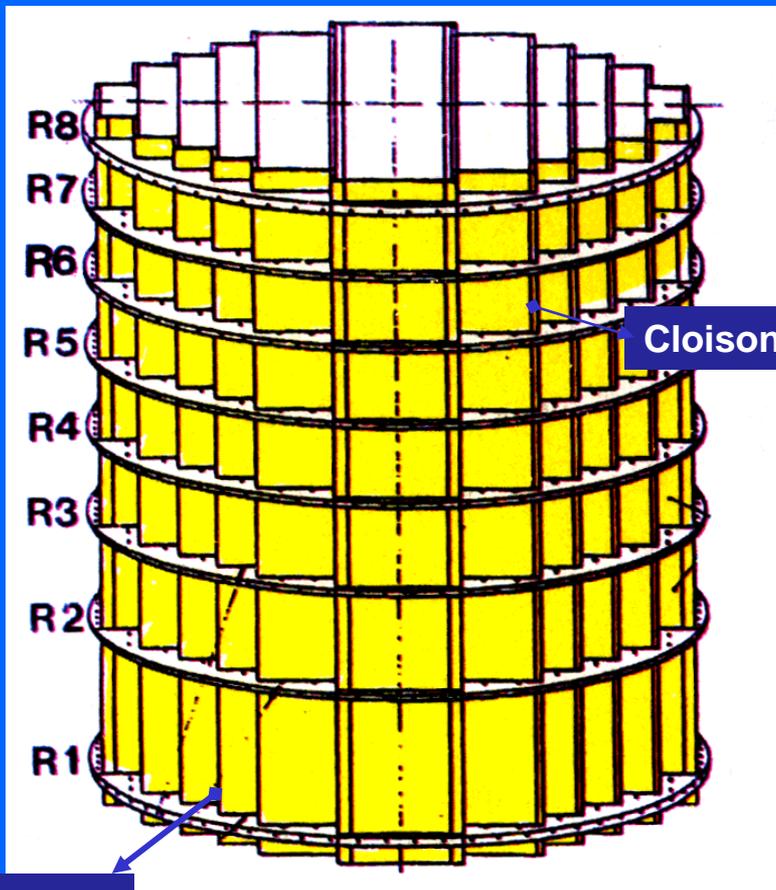
Régulièrement (3, 5, 7, 11...ans) on en prélève et on mesure les caractéristiques mécaniques.

On peut ainsi anticiper sur l'évolution réelle de la cuve :

à 11 ans on connaît la situation de la cuve en fin de vie...



Les internes de cuve



Cloisonnements

Renforts

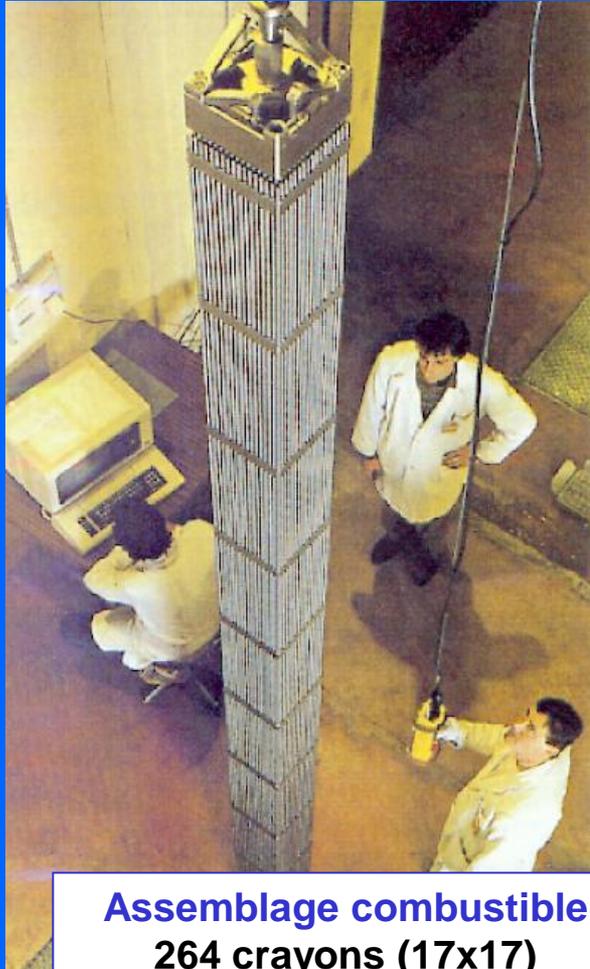
En acier inoxydable

Servent :

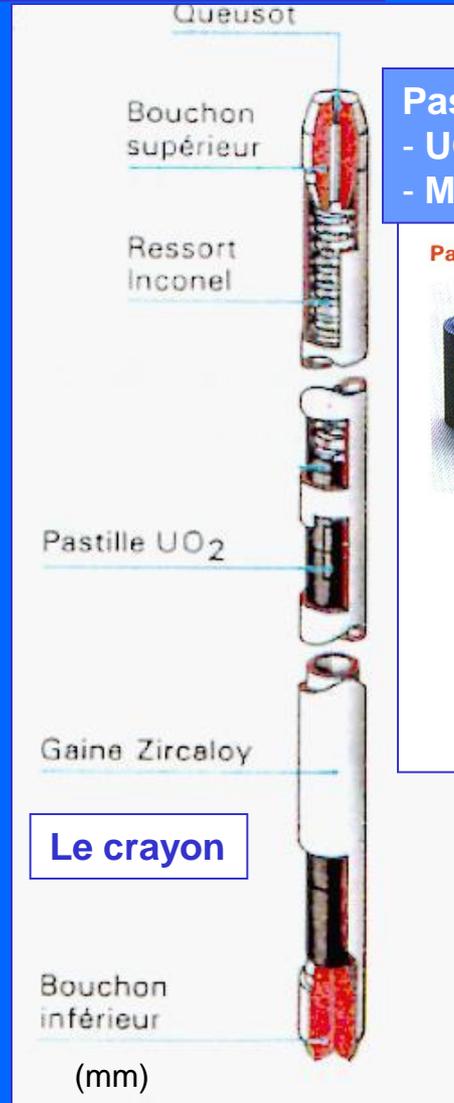
- à positionner les éléments combustibles
- à gérer la circulation de l'eau primaire



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

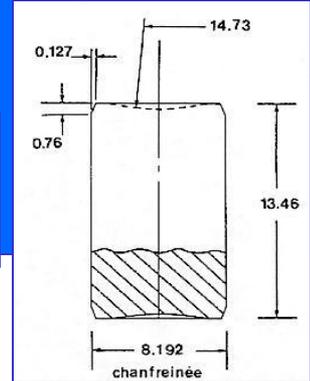


Pastilles combustibles :
- UO_2 (4% U^{235})
- MOX : +10 à 30% PuO_2

Pastilles combustibles



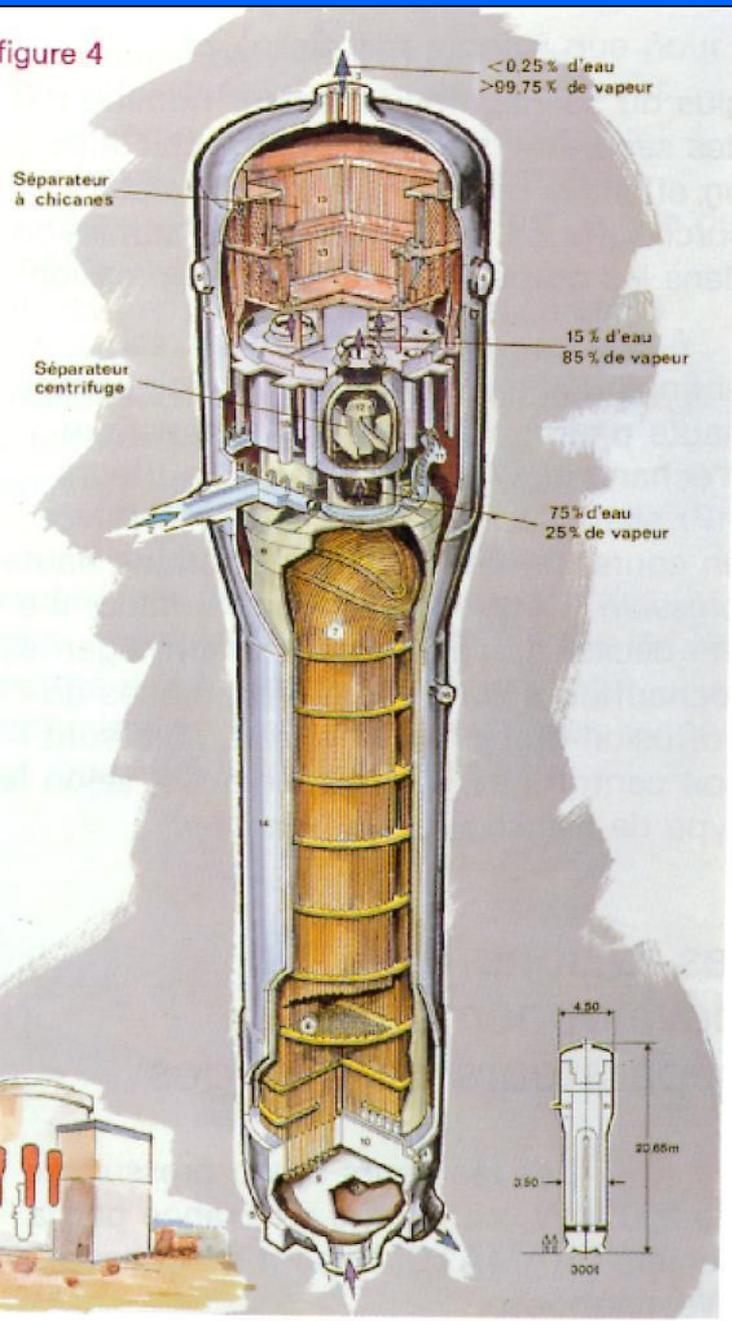
Tube de gainage en Zircaloy 4 ressorts et bouchons



Gaine, bouchons..
en alliage de zirconium

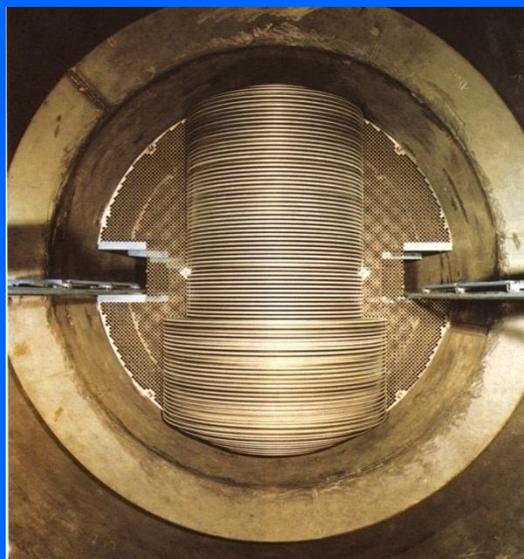
*Chaque année, on remplace 9.000 assemblages,
soit 2.400.000 crayons...*

figure 4



Générateurs de vapeur

Assure le transfert de chaleur entre l'eau du circuit primaire ($328^{\circ}\text{C} - 155$ bars) et l'eau du circuit secondaire ($238 \rightarrow 288^{\circ}\text{C} - 75$ bars) qui se transforme en vapeur sous haute pression (7800 t/h) pour alimenter les turbines (HP, MP et BP) qui font tourner l'alternateur...



Vue de dessus d'un GV en construction

A l'origine est apparu un problème de fissuration des tubes entraînant une fuite d'eau primaire (radioactive) dans le milieu secondaire... d'où des contrôles réguliers...

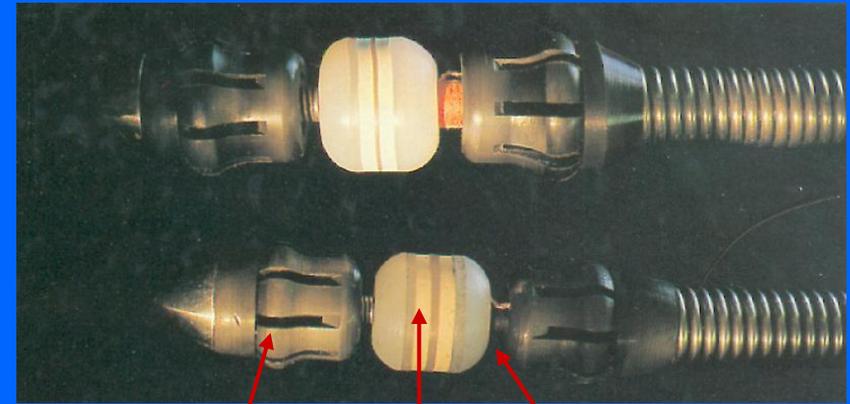
Comment détecter la présence de fissures dans les tubes de GV ?

Utilisation des courants de Foucault
(courants induits)
(méthode CEA)

Une sonde constituée par une bobine alimentée en courant haute fréquence induit un courant dans la pièce (courant de Foucault, similaires à ceux d'une plaque à induction), qui à son tour interfère avec la bobine.

La présence de défauts dans la pièce modifie les courants induits et donc le signal résultant.

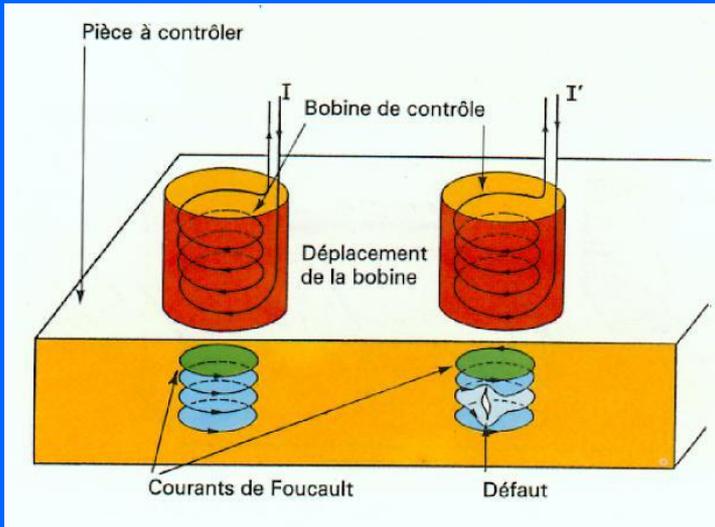
Sonde utilisée pour la détection des défauts dans les tubes des GV



guides

Bobine HF

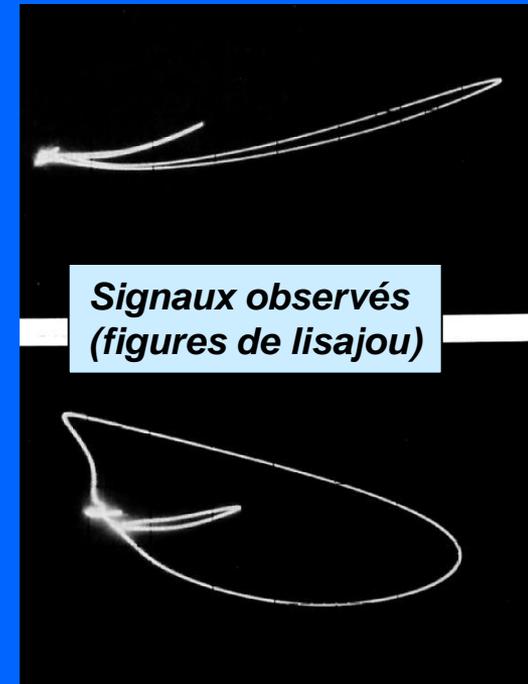
guides



En l'absence de défaut

Tube (A600)

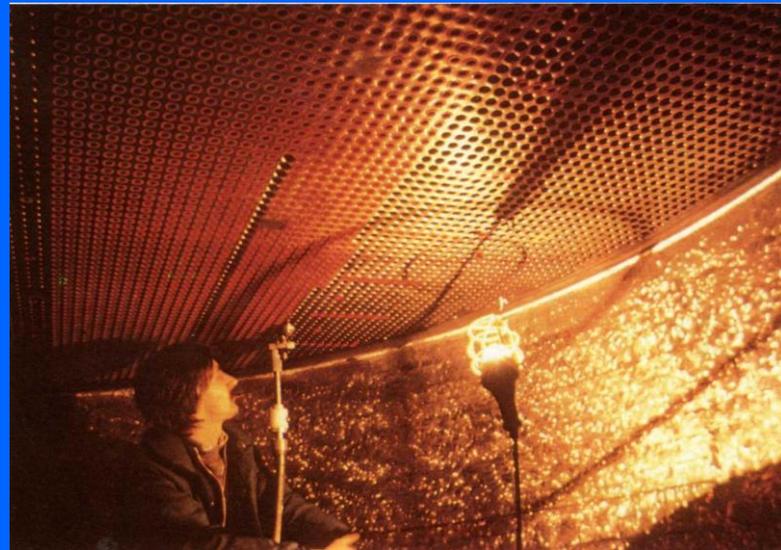
En présence de défaut



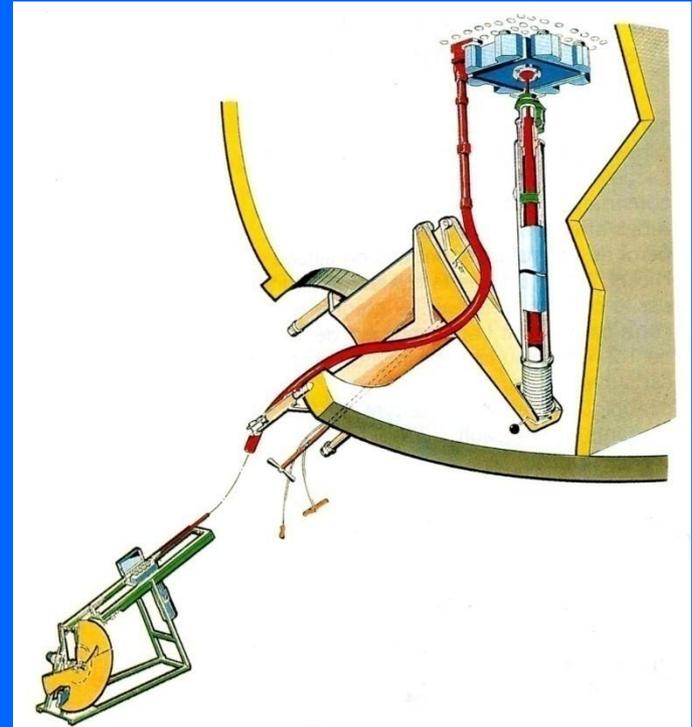
Signaux observés
(figures de lissajou)

Contrôle des tubes

*Utilisation d'une « araignée »
placée manuellement*



**Opération automatisée par
l'emploi d'un robot (MORPION)
piloté de l'extérieur.**

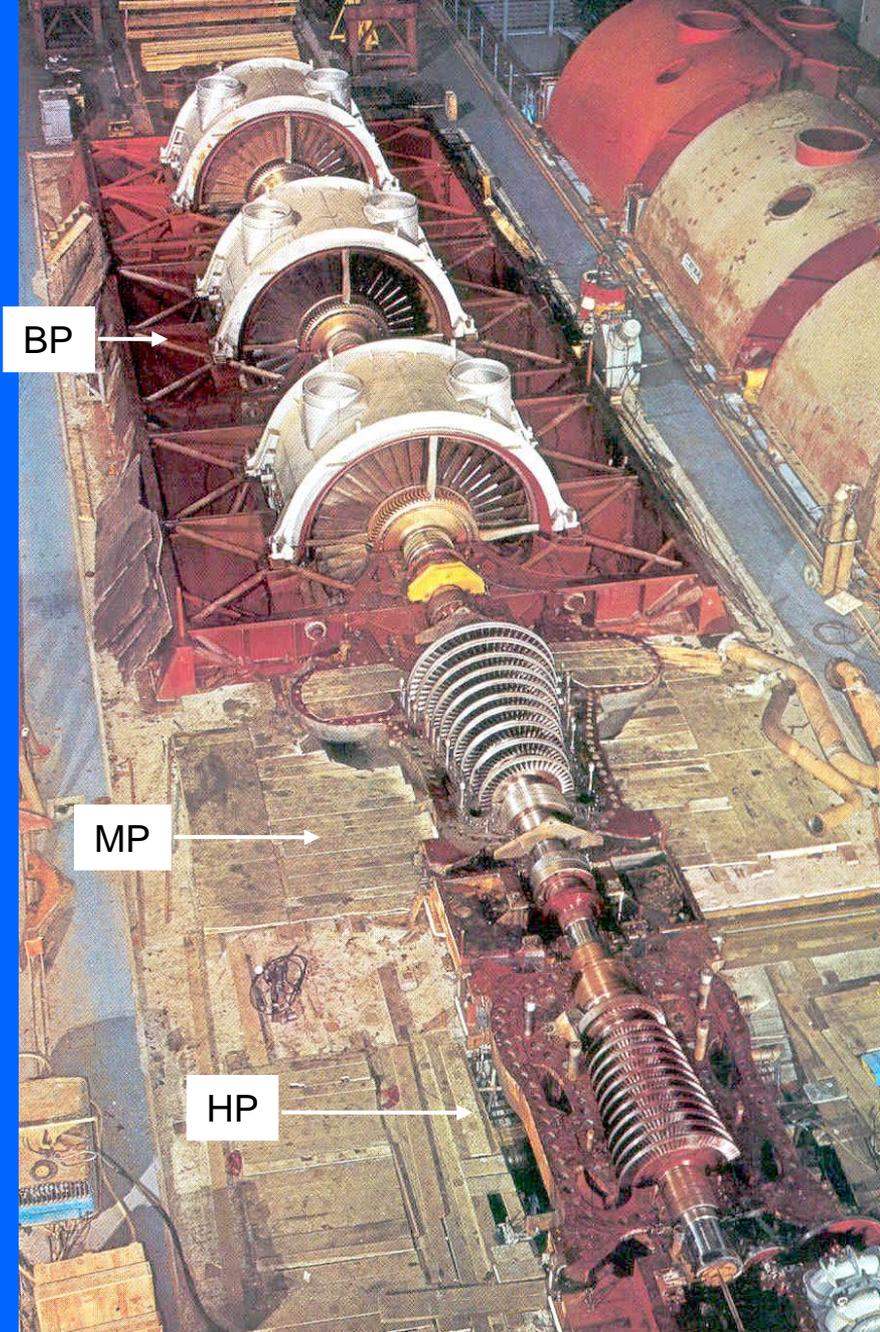


Salle des machines : les turbines à vapeur



7800 t/h sous 67,5 bars

*couplées à un alternateur pour produire
l'énergie électrique (1650 MVA)
puissance fournie : 1345 MW
vitesse de rotation : 1500 tr/mn
tension de sortie : 20 kV*

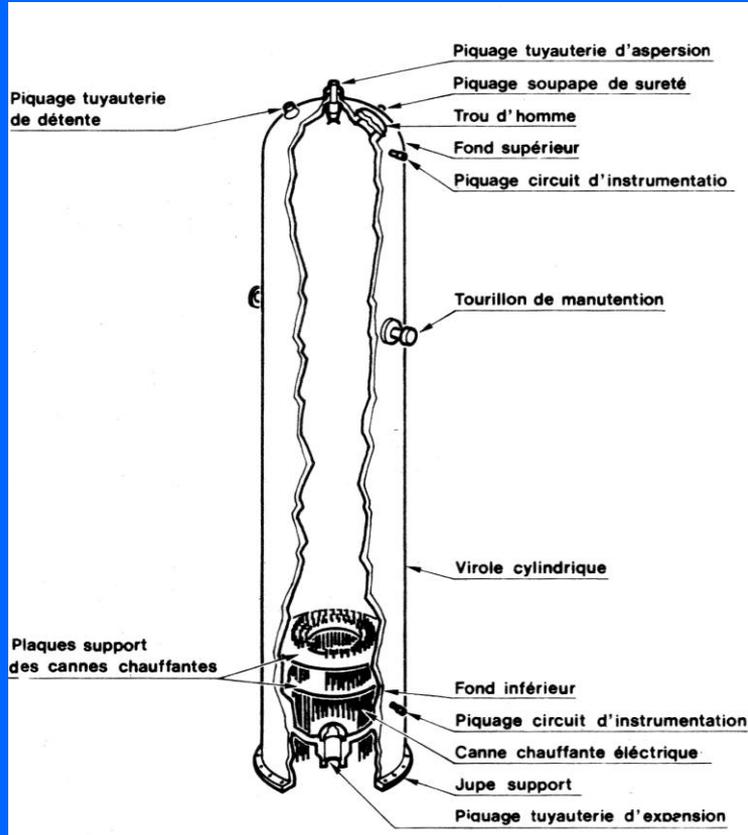


BP

MP

HP

Autres composants



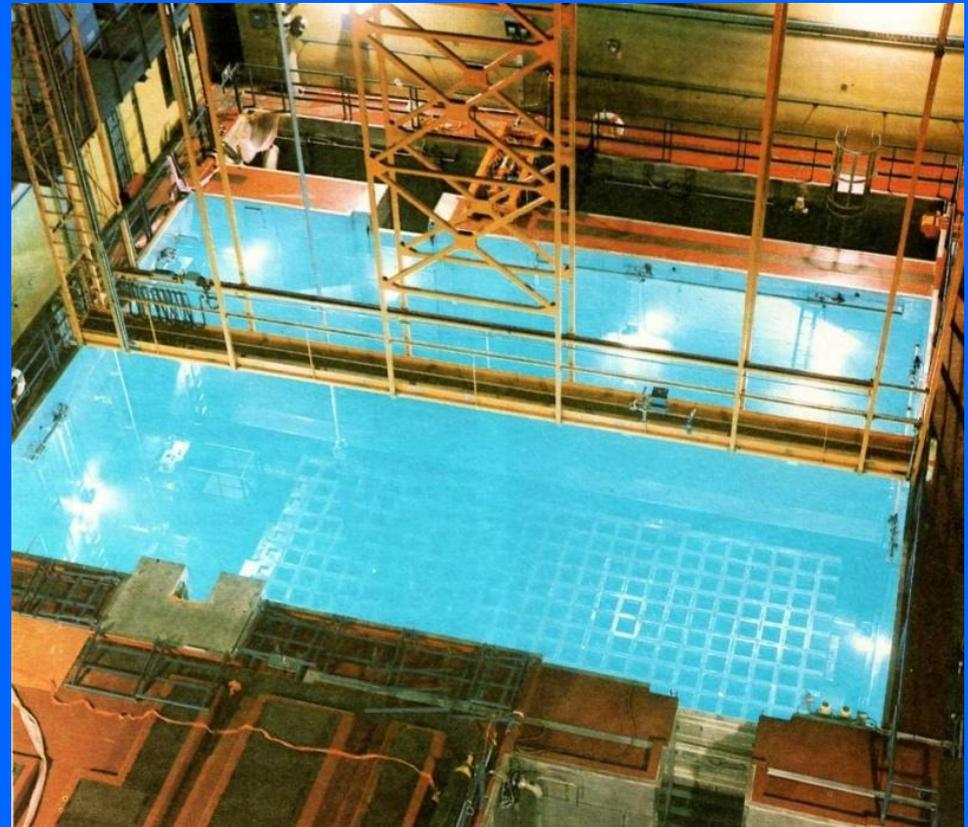
Le pressuriseur

Permet d'obtenir la pression de 155 bars grâce à une canne chauffante électrique.

Piscine de stockage

Le combustible usagé est stocké plusieurs années dans la piscine du bâtiment réacteur, avant d'être dirigé vers la Hague.

Les éléments combustibles (neufs, usés...) sont transférés entre la cuve et la piscine par un tunnel entre le bâtiment réacteur et le bâtiment combustible.



L'aéroréfrigérant

(centrales en bord de rivière)

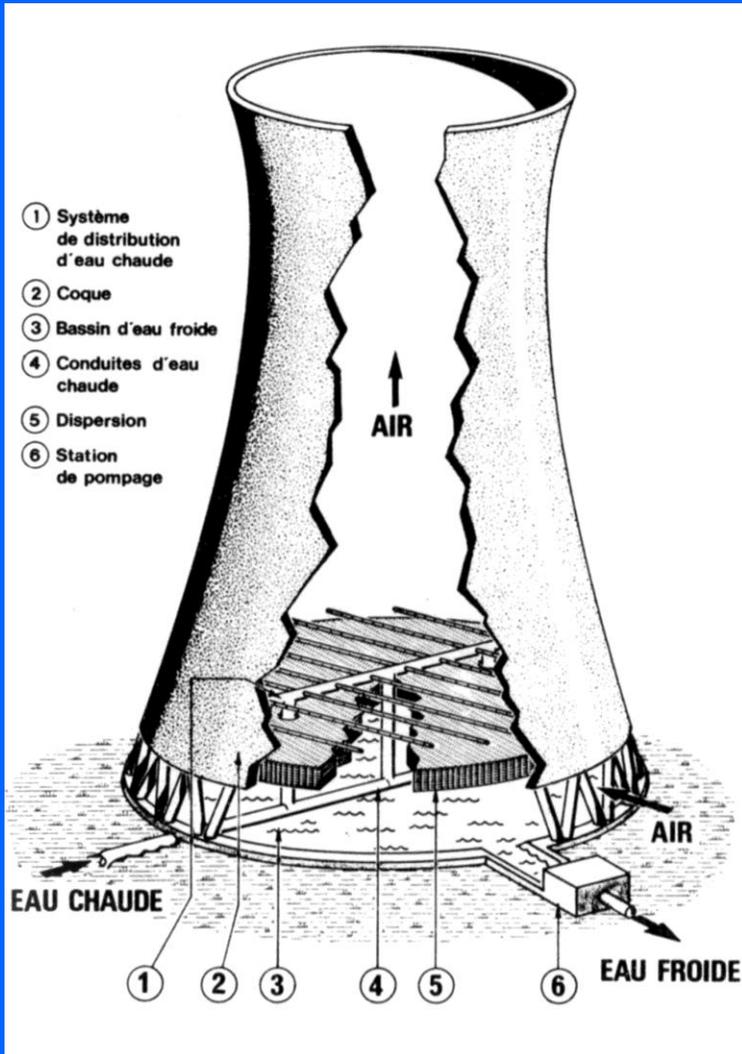
De type HAMON, permet de refroidir l'eau du circuit condenseur : l'eau chaude tombe en pluie et se trouve refroidie par le courant d'air (tirage naturel)

D'autres réfrigérants (SCAM) utilisent des ventilateurs (Chinon)

- hauteur totale 184 m

- diamètre à la base 155m

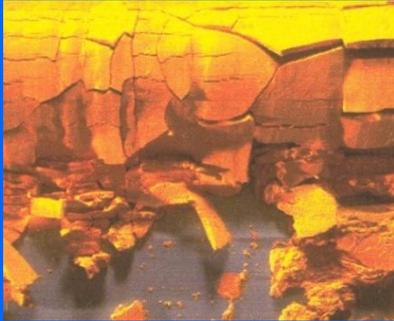
Le prélèvement d'eau extérieure ($\sim 1\text{m}^3/\text{h}$) sert à compenser les pertes par évaporation.





Salle de contrôle informatisée des réacteurs du palier N4 (Civax, Chooz)

Le cycle du combustible nucléaire et la gestion des déchets nucléaires



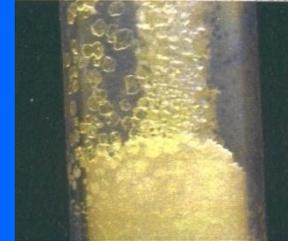
Minerai



« yellow cake » (U₃O₈)



UF₆ (gazeux)

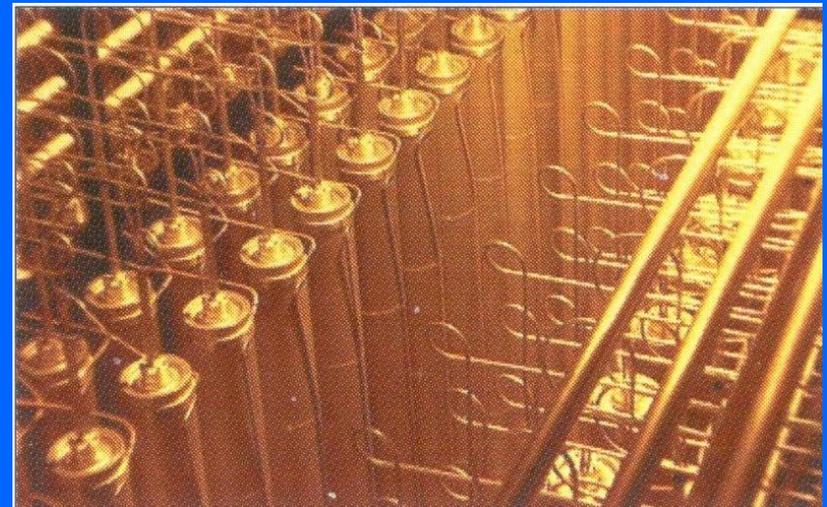


enrichissement : ²³⁵U de 0,7% à 4 à 5%

Diffusion gazeuse



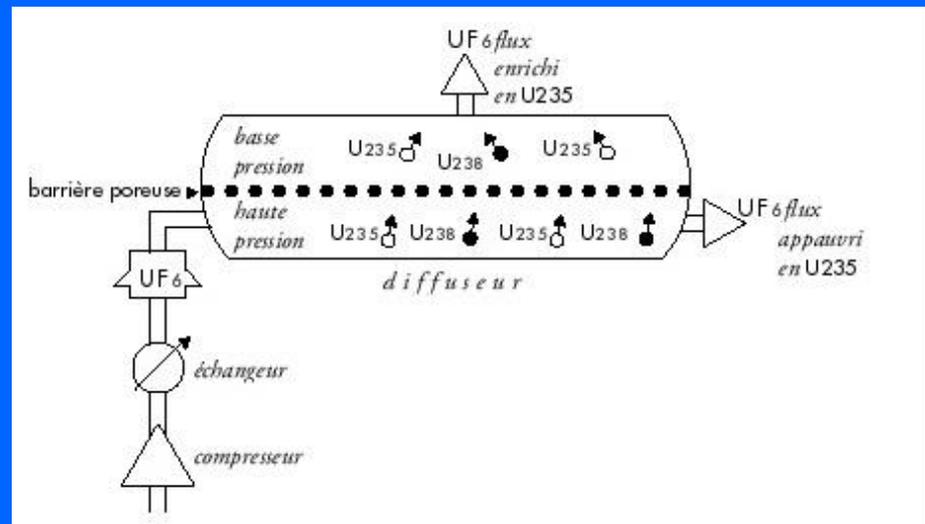
Centrifugeuses



Enrichissement par diffusion gazeuse

Utilise la diffusion de UF_6 au travers d'une paroi poreuse

U^{238} étant plus gros il diffuse moins facilement que U^{235} plus petit...



1400 étages réparties en 70 groupes de 20 étages (2000 tonnes d' UF_6)

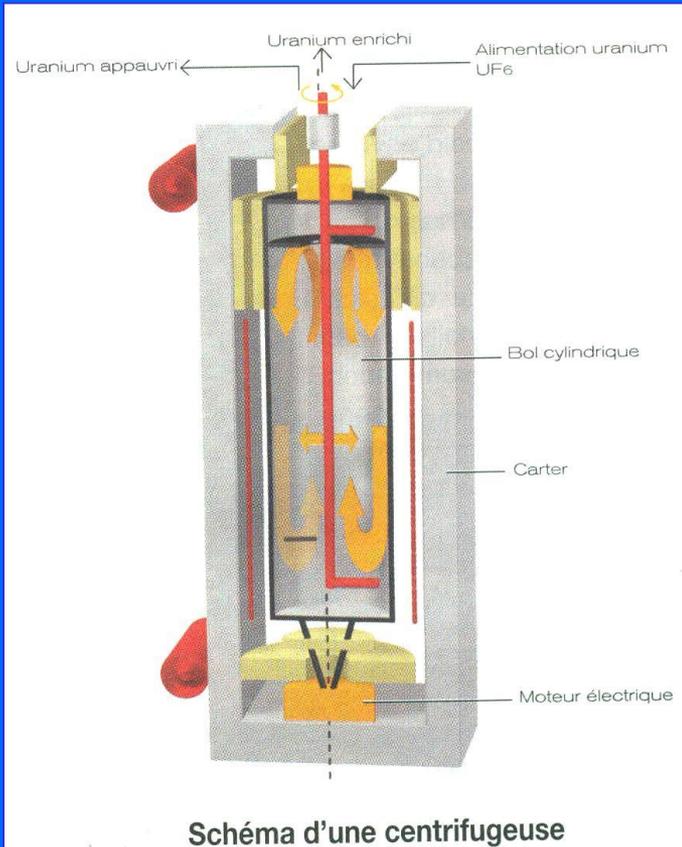
L'enrichissement par ultra-centrifugeuse

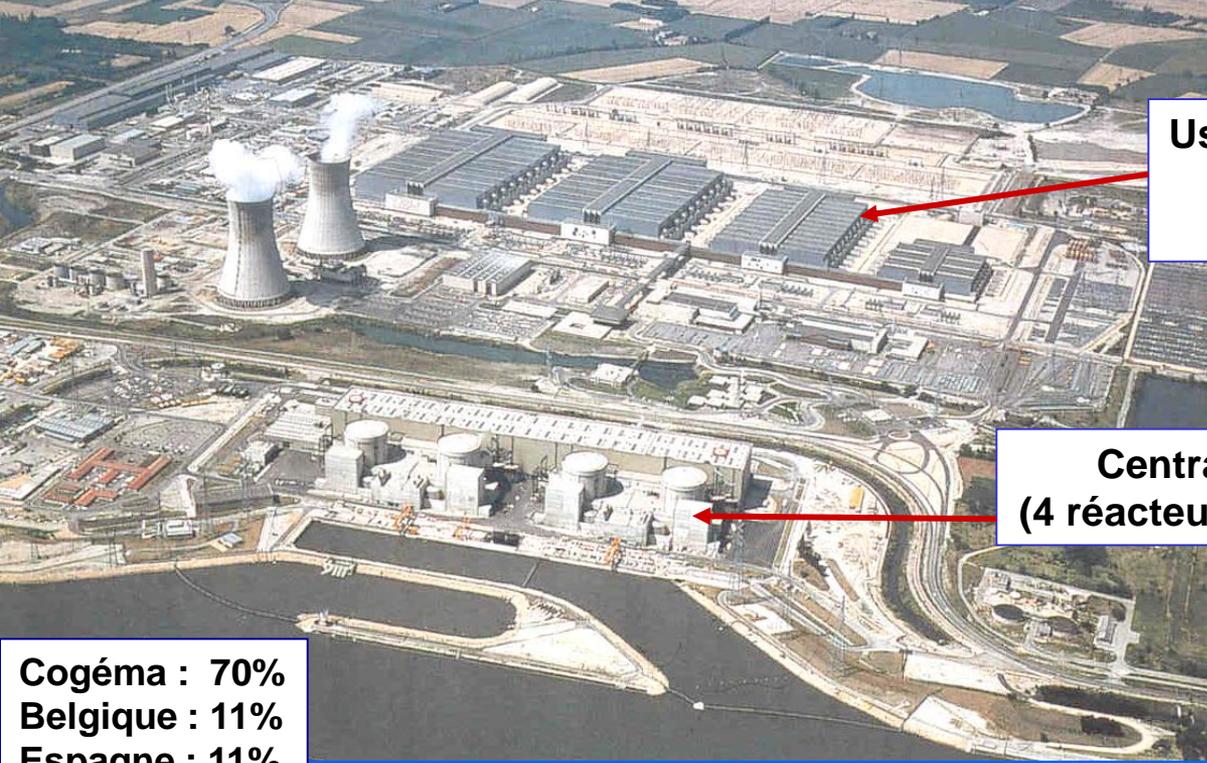
50 000 à 100 000 tr/mn :

on utilise la différence de force centrifuge entre les 2 isotopes de l'uranium

U^{238} étant plus lourd est éjecté plus facilement que U^{235} plus léger...

→ 4 à 5% en 30 étages





**Usine d'enrichissement d'Eurodif
(Usine Georges Besse I)
(par diffusion gazeuse)**

**25% des capacités mondiales
d'enrichissement**

**Centrale nucléaire de Tricastin
(4 réacteurs de 900MW soit 3760 MWe)**

**Cogéma : 70%
Belgique : 11%
Espagne : 11%
Italie : 8%**

**2007 : Usine Georges Besse II
ultra-centrifugeuses**

(utilise 50 fois moins d'électricité : 50 MW au lieu de 2500 MW)

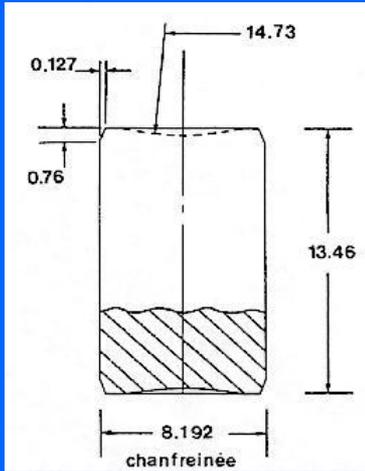
**2012 : fin d'exploitation de G. BESSE I
2010 – 2016 : construction de la deuxième unité de GB II
2016 - 2020 : construction de la troisième unité de GB II (?)
vers 2020 : fin du démantèlement de GB I**

coût approximatif : 300 à 400 M€

Fabrication du combustible

UF_6 → poudre d'oxyde

→ Pastilles d'oxyde UO_2



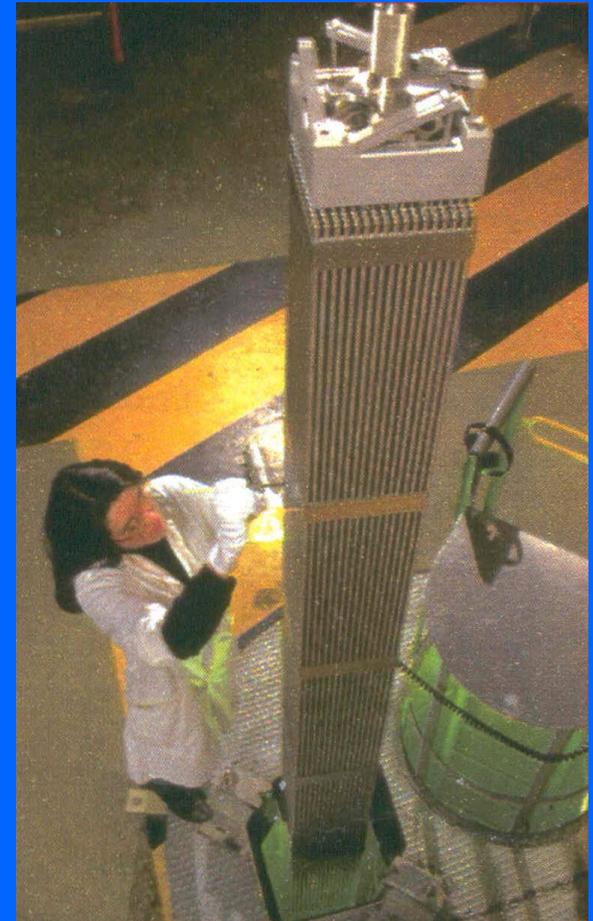
(mm)



crayons
(tubes en alliage de Zr)

Assemblage combustible
264 ou 289 crayons par
assemblage

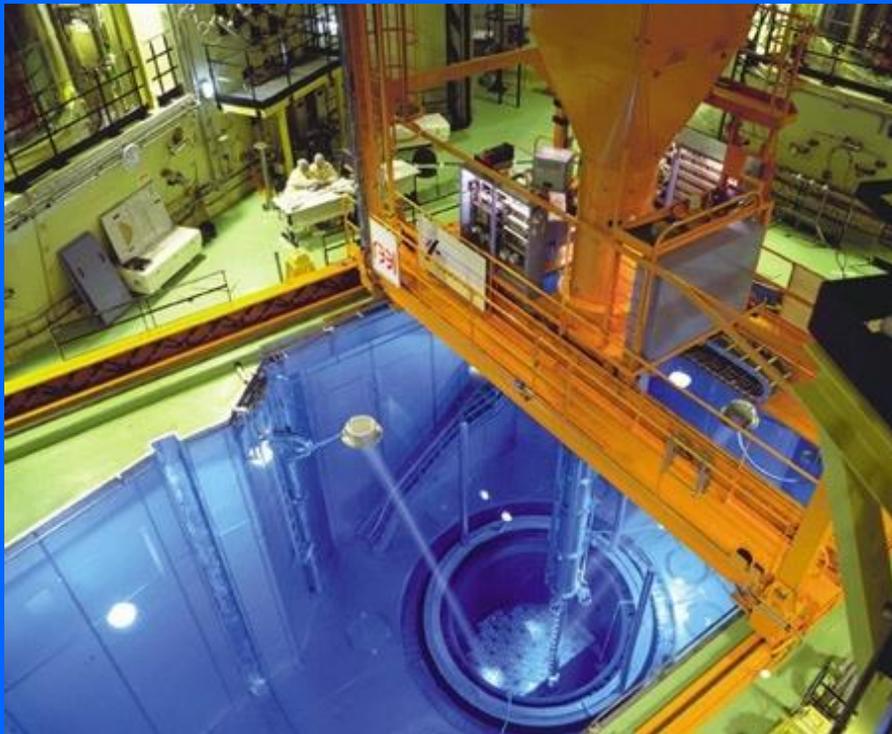
(+ gaine de contrôle)



Opération de chargement en combustible d'un REP.

L'enceinte en béton où est situé le réacteur est remplie d'eau

On peut alors enlever le couvercle et accéder sans risque d'irradiation au combustible

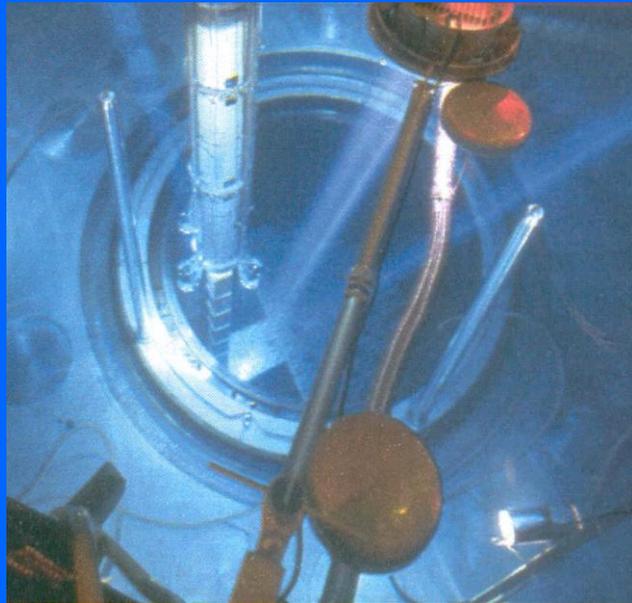


barres de contrôle

Mise en eau de la piscine réacteur

**Le combustible est introduit dans le cœur du réacteur pour une durée de 3 à 4,5 ans
Il est remplacé par tiers (par cycle de 12 à 14 mois)**

*A la fin des 3 cycles, le combustible n'est pas entièrement consommé
ce qui limite c'est la tenue de la gaine, en service et en entreposage.*



**Le combustible usagé est stocké
dans une piscine annexe du réacteur
pendant 2 ans minimum pour le laisser se
refroidir avant d'être transporté vers l'usine de
retraitement de La Hague dans des conteneurs
par voie ferrée, fluviale ou convoi routier.**



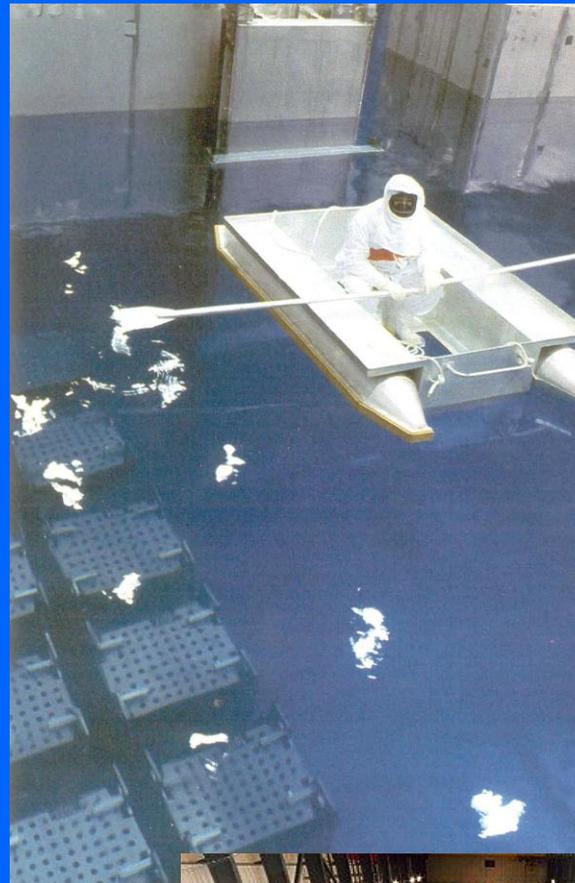
Usine de retraitement de La Hague



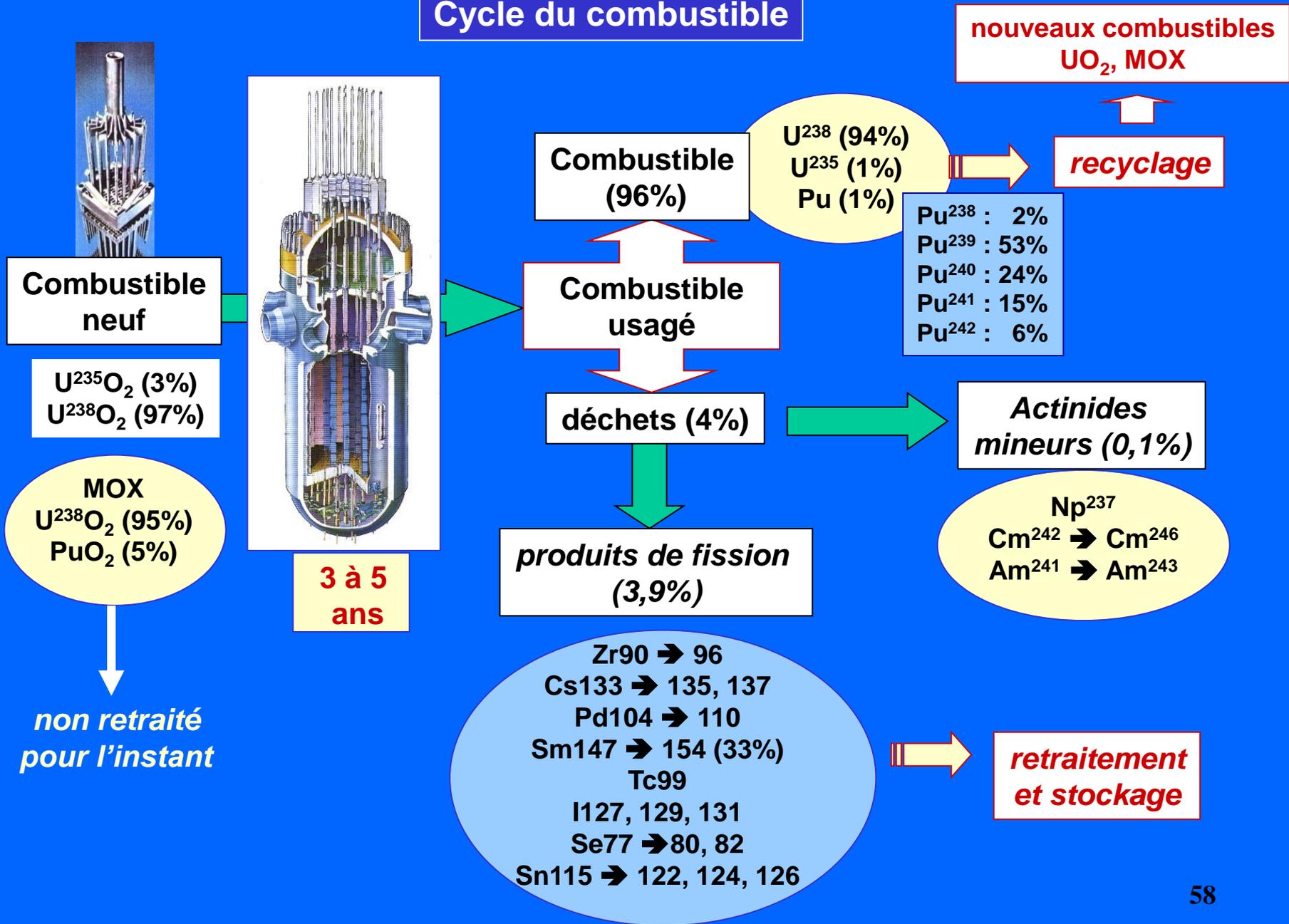
capacité de traitement : 1000 à 1500 tonne/an

Le combustible est ensuite stocké pendant 3 ans en piscine avant d'être découpé et retraité.

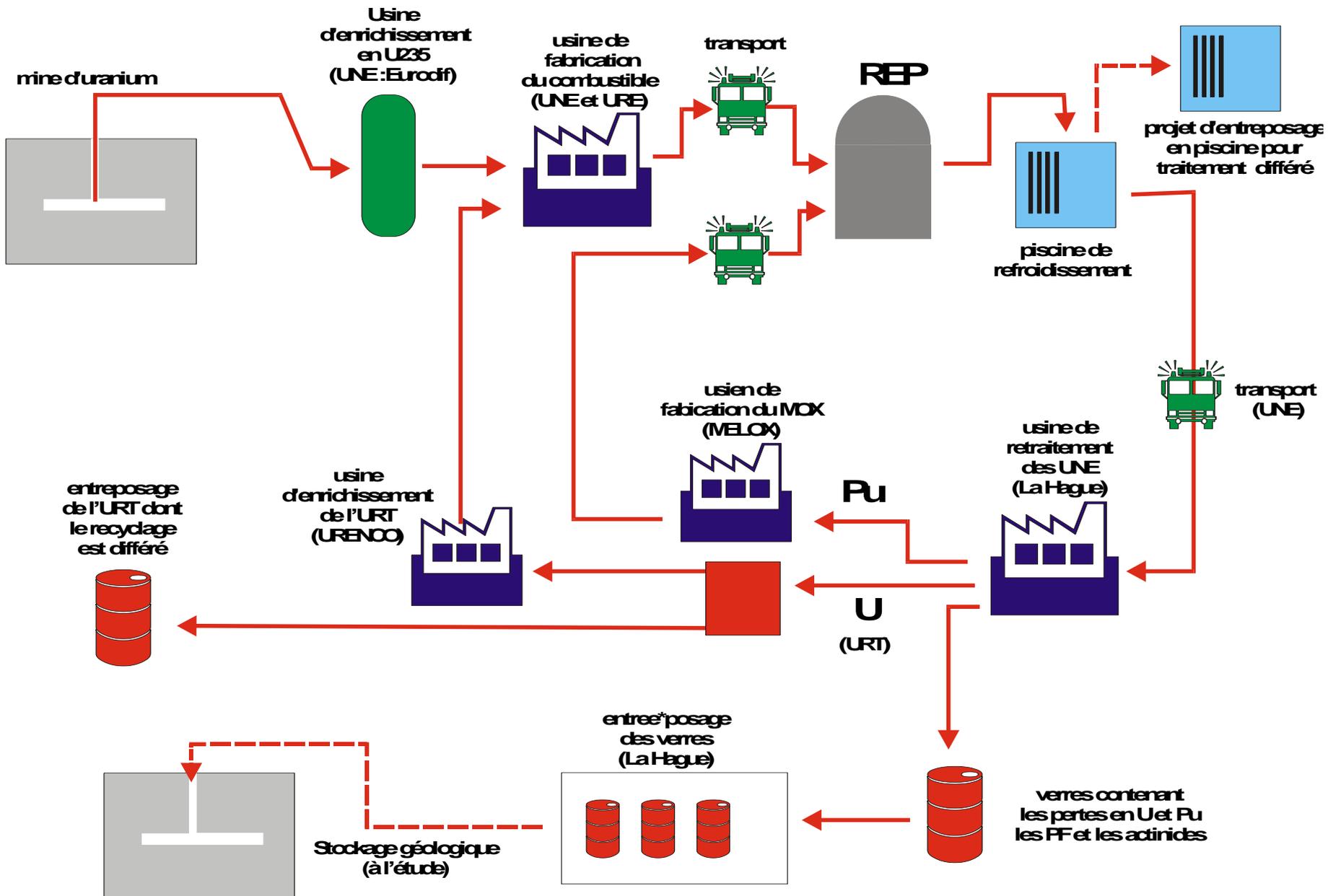
Le but du retraitement est de séparer les éléments combustibles pouvant être ré-utilisés (U^{235} et Pu^{239}) des produits de fission et des actinides (« déchets »)



Cycle du combustible



En résumé... Cycle du combustible dans les REP (version simplifiée)



La question des déchets nucléaires.

En France :

par an et par habitant, on produit :

- 6.000 kg de CO₂
- 3.000 kg de déchets divers
 - 1.800 kg déchets inertes
 - 700 kg déchets industriels banals
 - 500 kg d'ordures ménagères
- 100 kg de déchets toxiques industriels
- 1 kg de déchets radioactifs
- 10g de déchets nucléaires « haute activité »

« éternels » pour lesquels on n'a pas de solution pour les stocker ou les éliminer

62% industrie nucléaire

17% recherche universitaire

17% militaire

3% industrie non-nucléaire

1% domaine de la santé

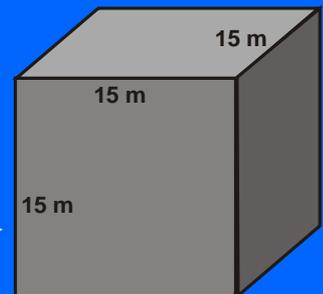
1 kg

900 g déchets faiblement actifs

90 g déchets moyennement radioactifs

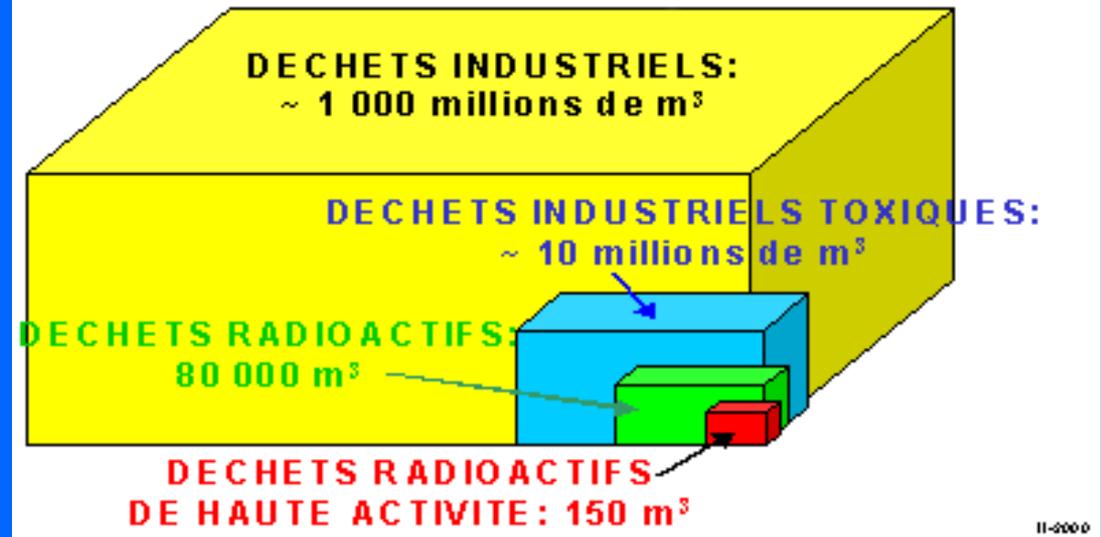
10 g déchets hautement radioactifs

2020 : 3600m³



Par TWh (10⁹ kWh) on produit 30 kg de Pu et 3 kg d'actinides (Np, Am, Cm...)⁶⁰

Les volumes de déchets
générés annuellement
dans l'Union Européenne :



A titre de comparaison, une centrale thermique au charbon de 1000 MW :
(production 6,6 TWh/an)

a) consommera 4 millions de tonnes de charbon

b) produira :

10 millions de tonnes de CO₂

41.000 tonnes de SO₂

25.000 tonnes de NO₂

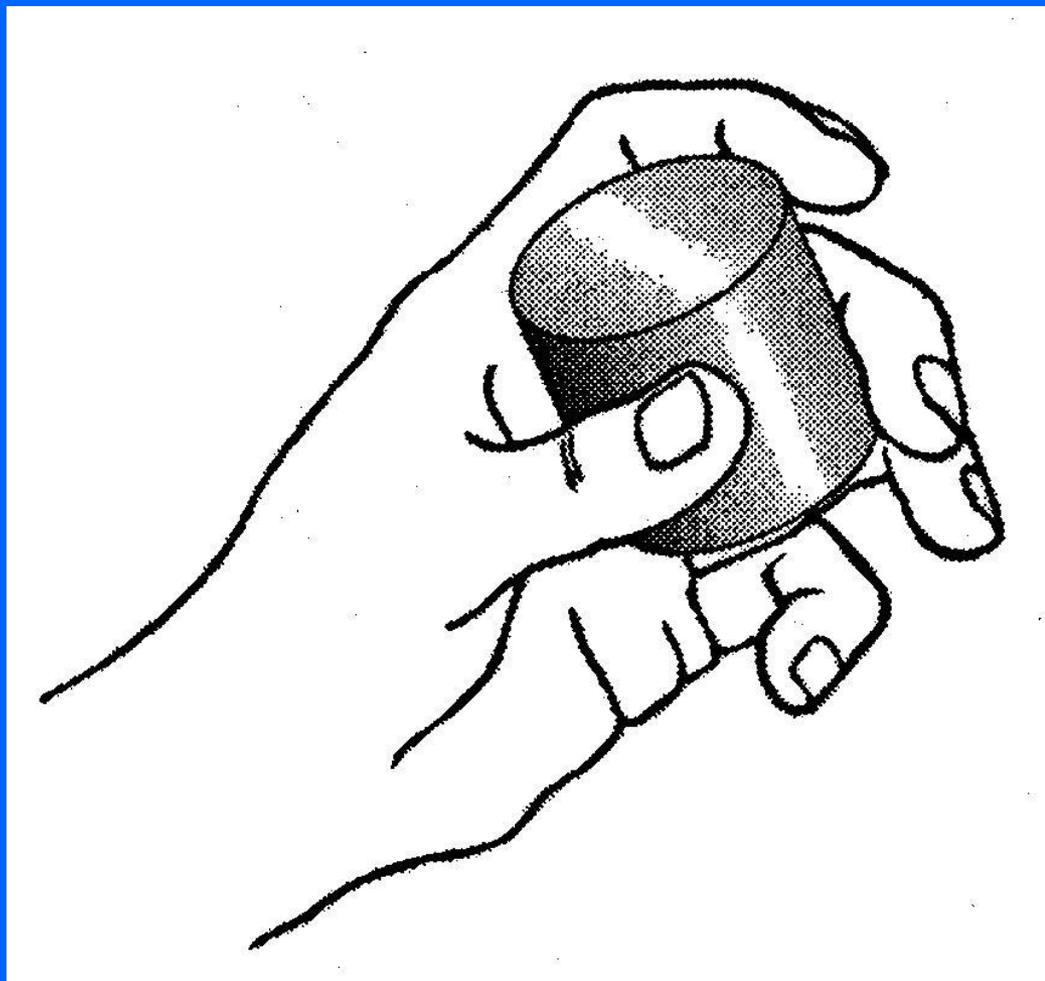
25 à 80.000 tonnes de HCl

} pluies acides (H₂SO₄, HNO₃, HCl)

300.000 tonnes de poussières, déchets solides (400kg métaux lourds)

700.000 Bq de déchets radioactifs (U, Th présents dans le charbon)...

*Pour produire la même énergie, la centrale nucléaire consommera 27 tonnes
d'uranium enrichi et produira 14 m³ de combustible usagé
(~1 m³ de déchets hautement radioactifs)...*

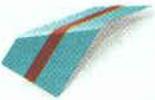


Quantité de déchets nucléaires vitrifiés de haute activité (C) générée **pendant 30 ans** pour fournir l'énergie électrique à une famille de 4 personnes équipée « tout électrique » (chauffage inclus)

Durée de « vie » de quelques déchets banals

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	moins de 1 an	1 an	1 à 4 ans	2 à 5 ans	13 ans	100 ans	200 à 400 ans	450 ans
								
Ticket de métro	Peau de banane	Chaussette en laine	Morceau de bois naturel	Papier de bonbon	Morceau de bois peint	Couvercle en acier	Emballage en aluminium	Emballage en plastique

*Les déchets chimiques toxiques, métaux lourds, etc . :
durée de vie illimité*

Container béton
stockage en surface
(Morvilliers – Aube)

Container béton
stockage en surface
(Soullaines – Aube)

Vitrification
Stockage à la Hague
en attente de décision

*pourraient être
rejetés dans la
nature sans risque
comme dans les
autres pays !*

Loi bataille
(30/12/91)

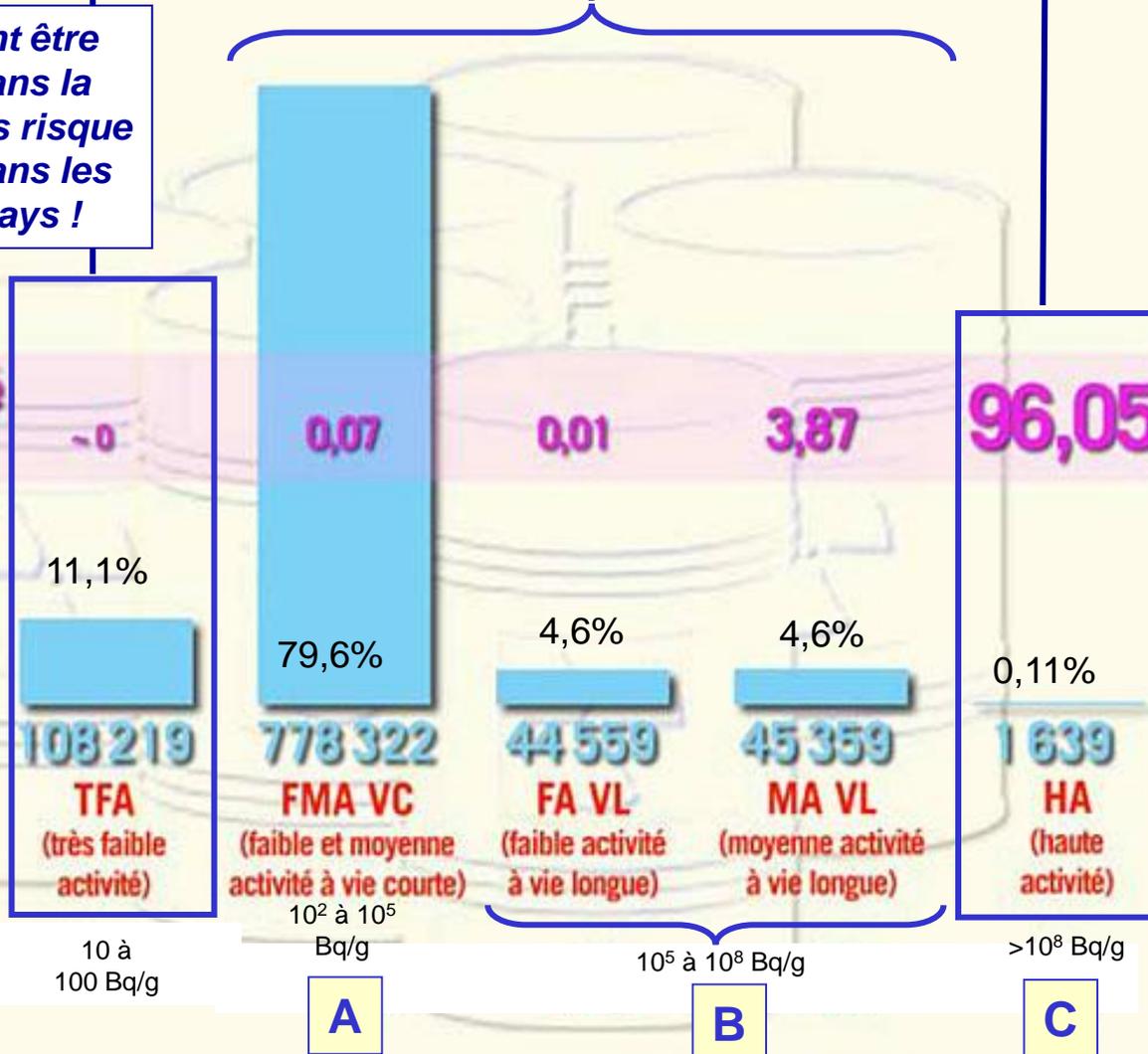
Etudes sur :

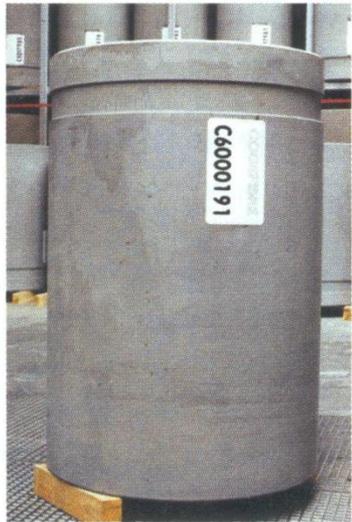
- 1 – l'incinération des déchets
- 2 – Stockage en sub-surface
- 3 – Stockage en site profond

Radioactivité
(en %)

Volume
en m³ équivalent
conditionné

Part de déchets
conditionnés
(en %)





Cimentés



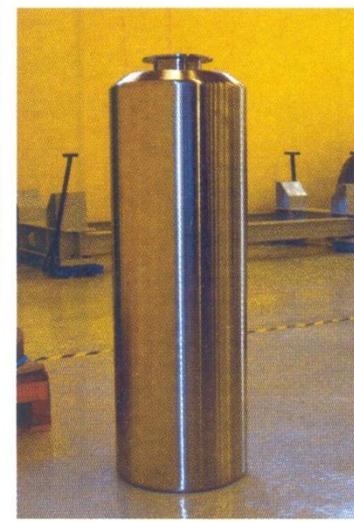
Compactés



Bitumés



Blocs de verre



Vitrifiés

- Différents types de colis de déchets



verre « nucléaire »

**150 litres – 400kg
3 assemblages combustibles**

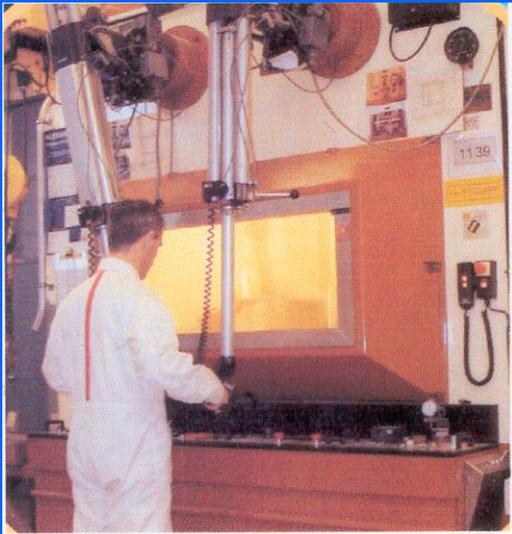
Les déchets de catégorie « C » (HA haute activité – HAVL vie longue)

produits de fission et d'activation : Cs^{137} – Sr^{90} – actinides (Am, Cm, Pu...)

On produit 200m³/an (cube de 6 m de côté)

prévision 2020 : 5 000m³ (cube de 17m de côté)

2 ans en piscine REP – 5 à 10 ans à la Hague → retraitement puis stockage définitif



Laboratoire « chaud »
(retraitement du combustible)

Emballage TN28



chargement de conteneurs
de verres dans un emballage
TN28 (La Hague)

L'avenir des déchets radioactifs

Loi « Bataille »
30 décembre 1991

Définir 3 axes de recherches pour les 15 ans à venir (1992 – 2006)

AXE 1

Réduire la quantité de déchets
par transmutation
(réduire la durée de vie des radioéléments)

AXE 3

Entreposage de longue
durée en surface ou sub-surface

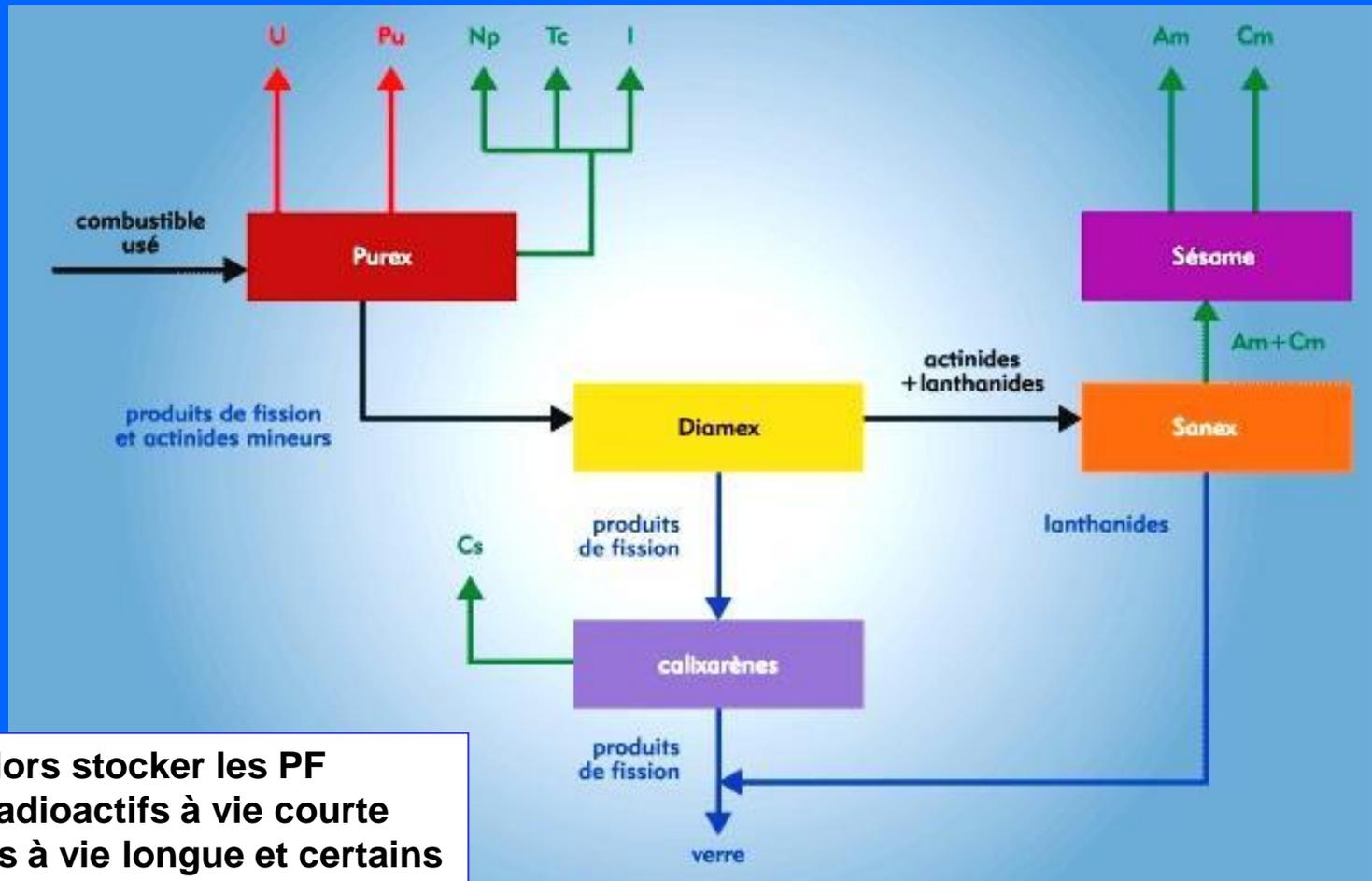
AXE 2

Stockage en site
souterrain profond

Coût de l'étude sur 15 ans : 2,2 milliard d'euros

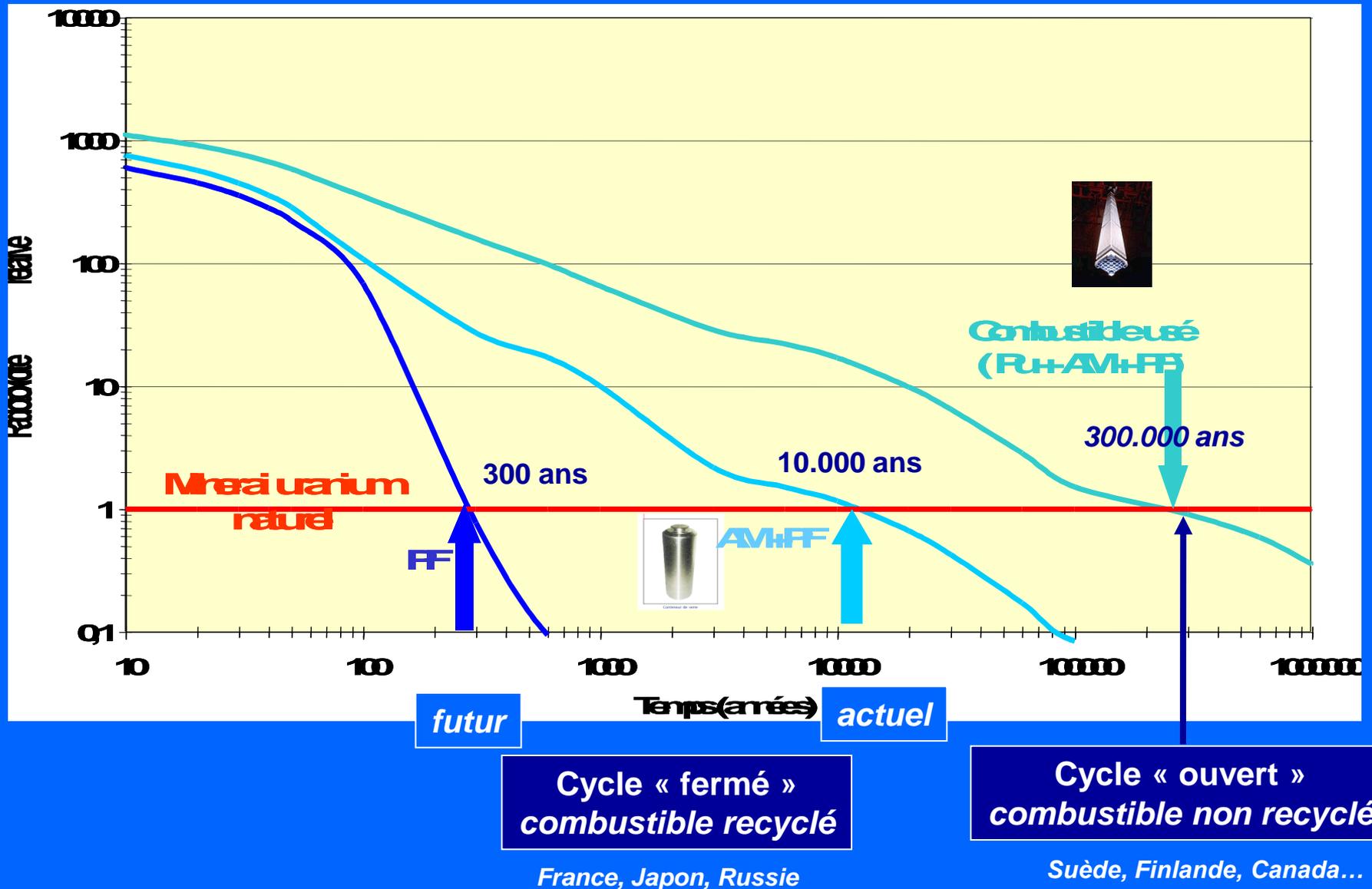
AXE 1 - a) Retraitement poussé

Le procédé actuel (Purex) permet de séparer les éléments fissiles des déchets.
De nouveaux procédés (Diamex, Sanex...) permettront de séparer les produits de fission
les lanthanides et les actinides.



On pourra alors stocker les PF hautement radioactifs à vie courte des actinides à vie longue et certains PF, afin de pouvoir les transmuter.

Sans les actinides, la radioactivité des déchets (PF) sera égale à celle du minerai au bout de 300 ans seulement ...

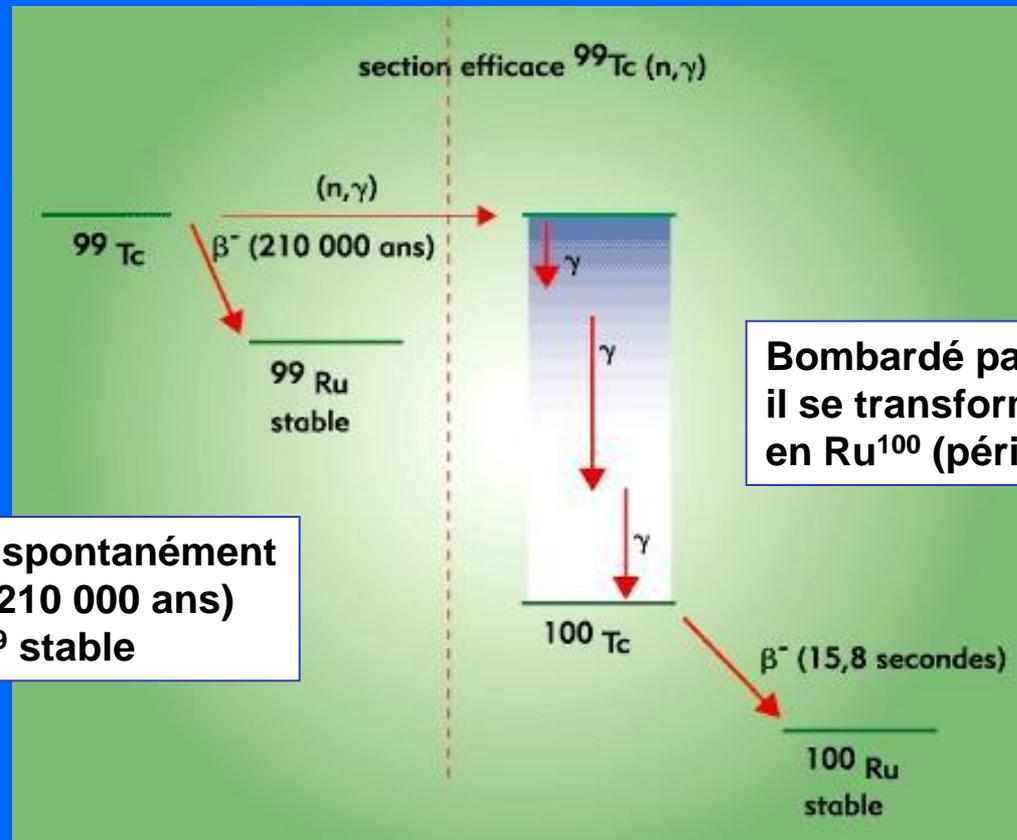


AXE 1 – b) Transmutation (« incinération »)

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

exemple : Tc^{99}

PF très actif



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

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

Moyens :

1) les RNR (neutrons rapides)

- filière refroidie au Na :

Superphénix : arrêt (politique) en 1997

(les études ont été reprises dans Phenix, arrêté en 2009)

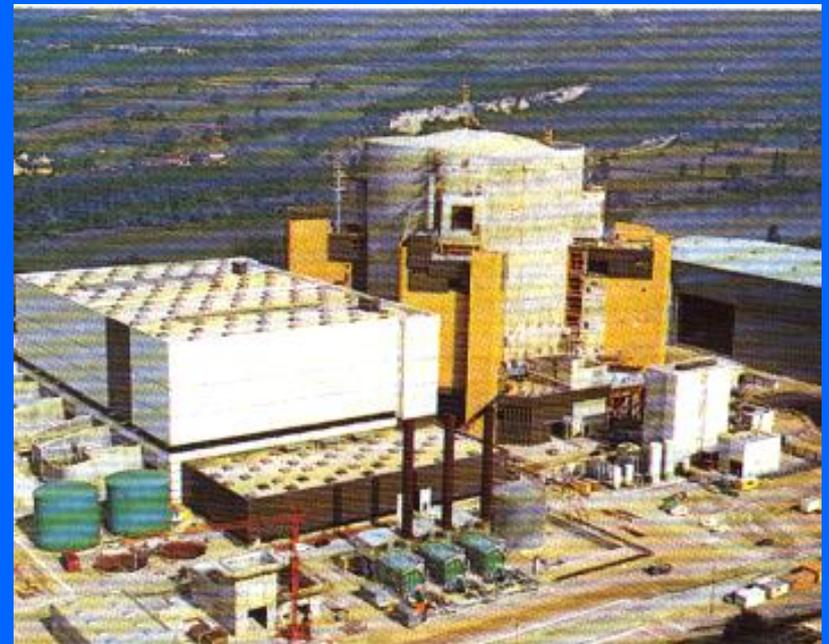
- certains les réacteurs de la génération IV (2050)

- RGCR, VHTR (réacteur à gaz haute température)

- réacteurs à sels fondus



Phénix (250MW)



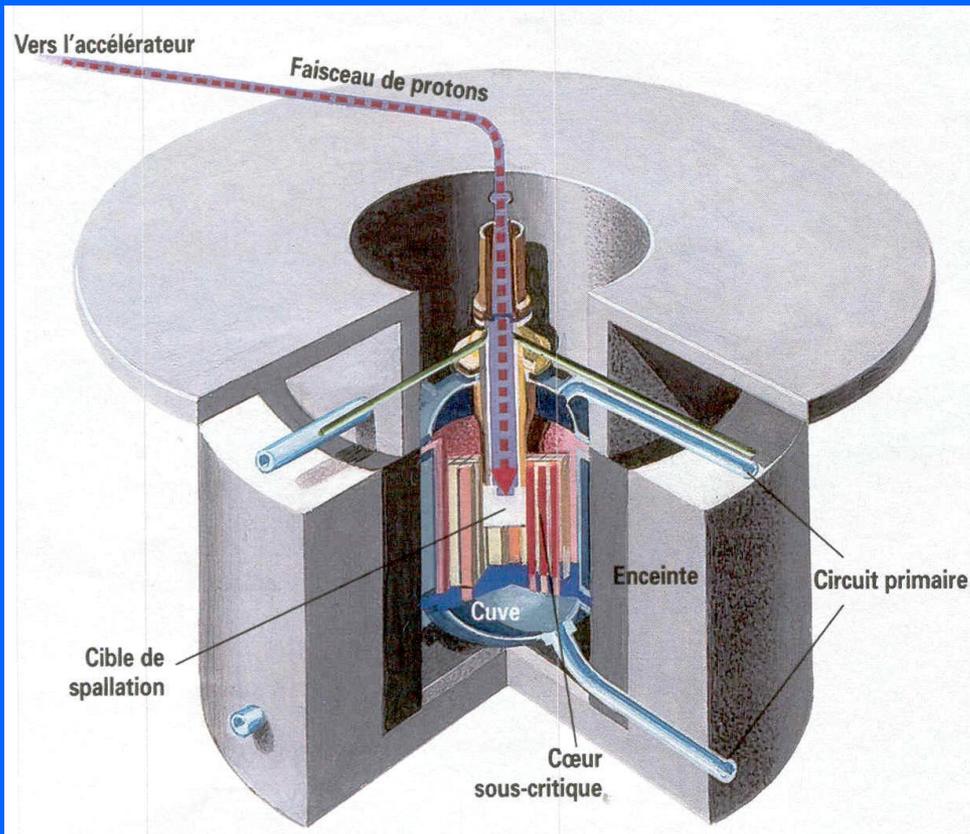
SuperPhénix (1200MW)

2) Les réacteurs hybrides sous critique

La réaction nucléaire est obtenue par un flux de neutrons engendré le bombardement par un faisceau de protons accélérés sur une cible métallique (spallation)

Avantages :

- le réacteur s'arrête spontanément en cas d'arrêt du faisceau protonique
 - spectre neutronique rapide favorable à la transmutation
- ! la mise au point d'un accélérateur puissant et fonctionnant en continu*



Un prototype (« Guinevere ») vient d'être mis en service à Mol en Belgique (CEA, CNRS, MOL).

En attendant MYRRHA, prévu pour 2023.

AXE 2 - stockage profond

But : stockage sur de très longue durée sans interactions avec la biosphère

sites géologiques possibles :

- site argileux
- site granitique

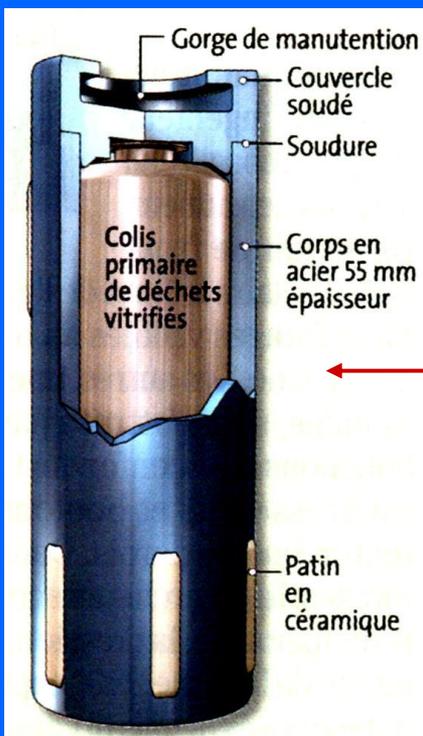
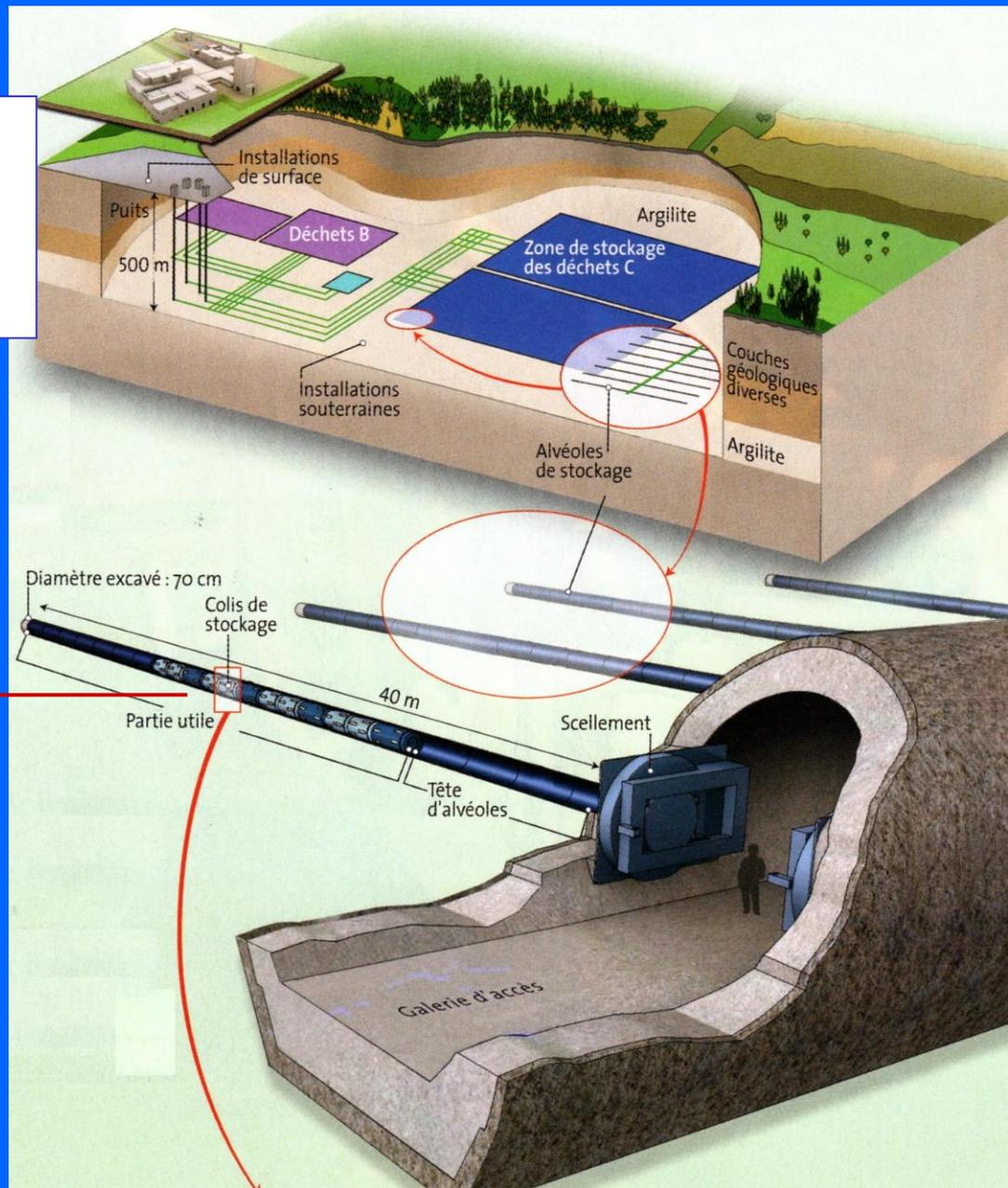
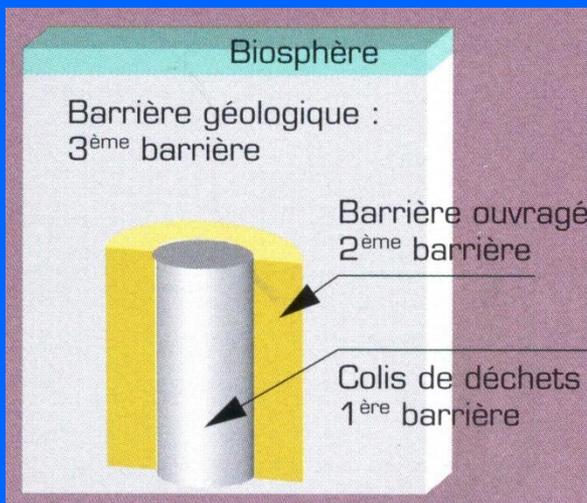


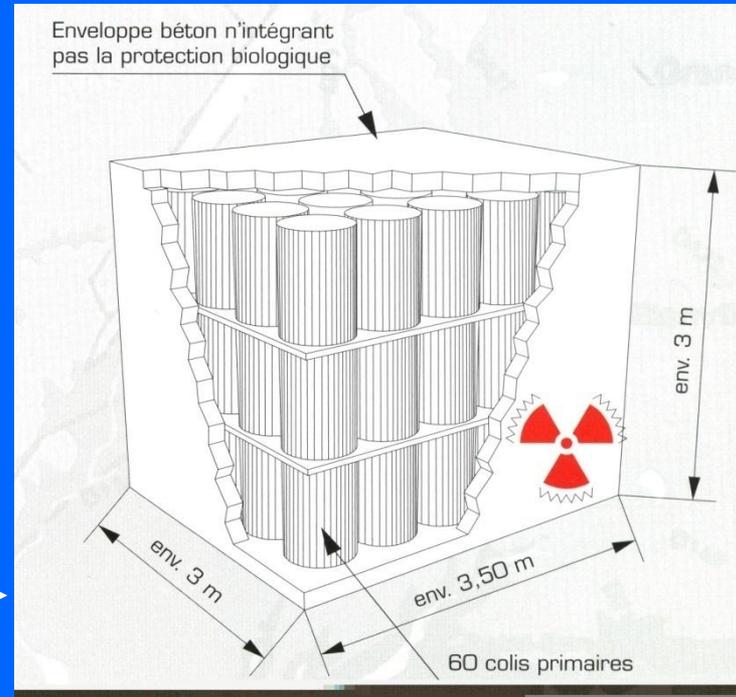
Schéma général d'un site de stockage profond





L'isolation entre les déchets radioactifs et la biosphère est assurée par 3 barrières :

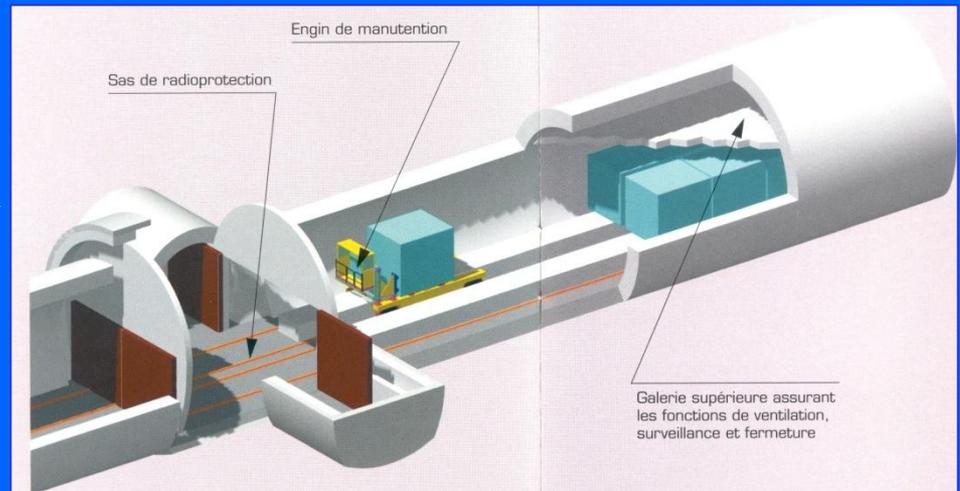
- le colis de déchets

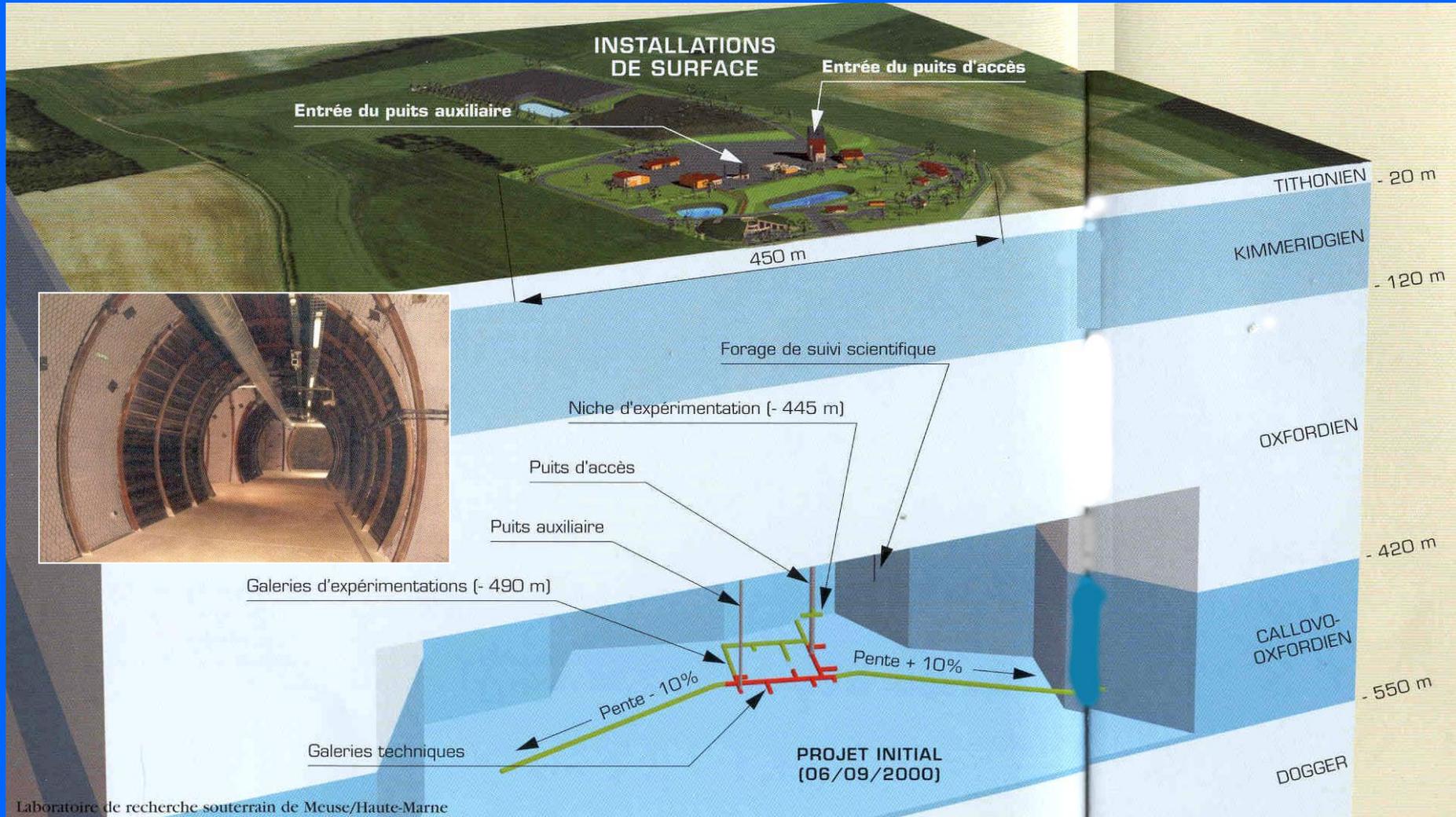


- la barrière ouvragée (galeries)

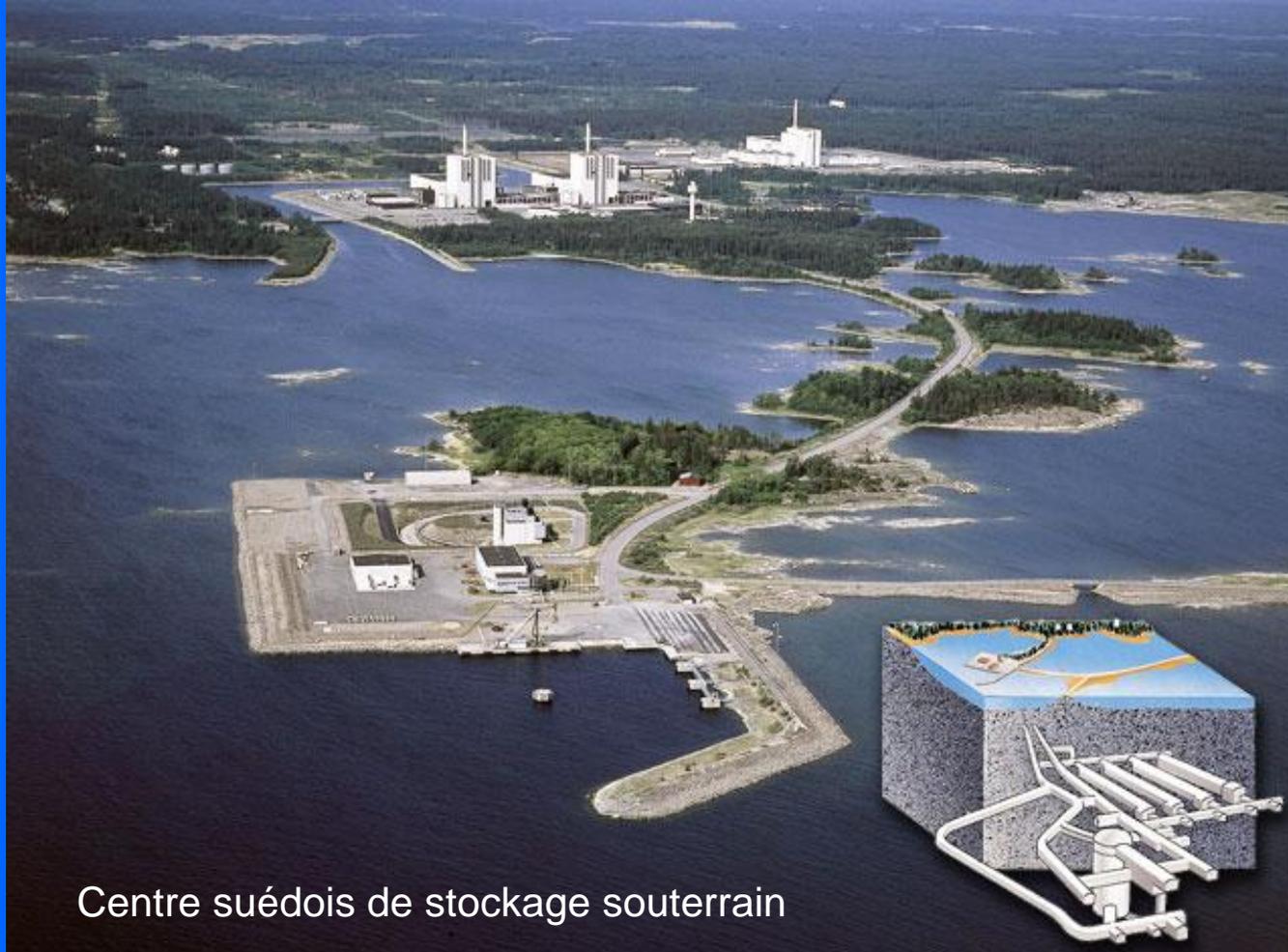
alvéole de déchets B

- la barrière géologique (étanche)
(argileuse ou granitique)





Le laboratoire de recherches de Bure



Centre suédois de stockage souterrain

De son côté, la Finlande a commencé en 2004 la construction de son centre de stockage souterrain près du site nucléaire d'Olkilouto à 500m de profondeur dans le bouclier cristallin scandinave.

Mise en service prévue : 2020

Durée d'exploitation : 100 à 120 ans

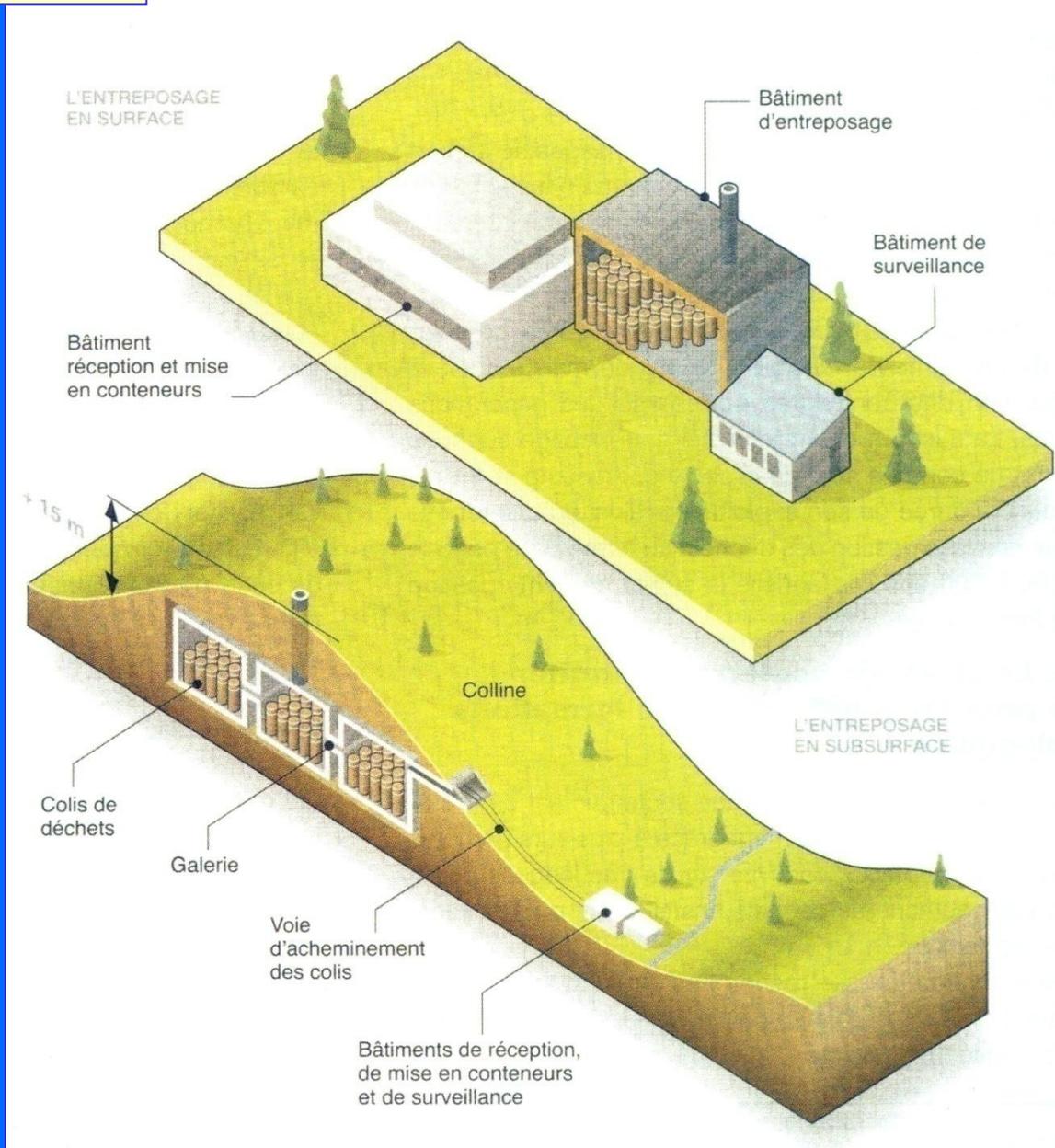
Y seront stockés les barres de combustible usagé dans des containers en Cu entourés d'une couche d'argile.

AXE 3 - Stockage en sub-surface

destiné au combustible
usé non retraité

Étude réalisée par le CEA

Construite au flanc de colline,
à 50m de profondeur dans un
massif de roche dur, au dessus
de la nappe phréatique, avec
drainage des eaux par gravité.
L'accès se fait à l'horizontal.



Conclusions du Rapport « Bataille – Berraux » de mars 2005 :

Les 3 axes sont complémentaires :

- L'entreposage en surface de longue durée est nécessaire pour réduire l'activité des déchets HA**
- L'entreposage profond dans des sites géologiques est sûr et incontournable**
- La diminution des durée de vie de certains radioéléments par transmutation est une solution réaliste et indispensable**

Calendrier envisagé :

2013 – choix de site de stockage profond

2016 – mise en service d'un site de stockage longue durée en surface

2025 – mise en service d'une site de stockage profond

2040 – transmutation à l'échelle industrielle des actinides

Conclusions

L'énergie nucléaire représente une part importante dans la production d'électricité mondiale.

Potentiellement « dangereuse », elle est certainement l'industrie la plus surveillée et la plus contrôlée ! D'où le très faible nombre d'accidents graves depuis 60 ans...

Bien que très médiatisés, ces accidents ont potentiellement fait moins de victimes que bien d'autres activités...

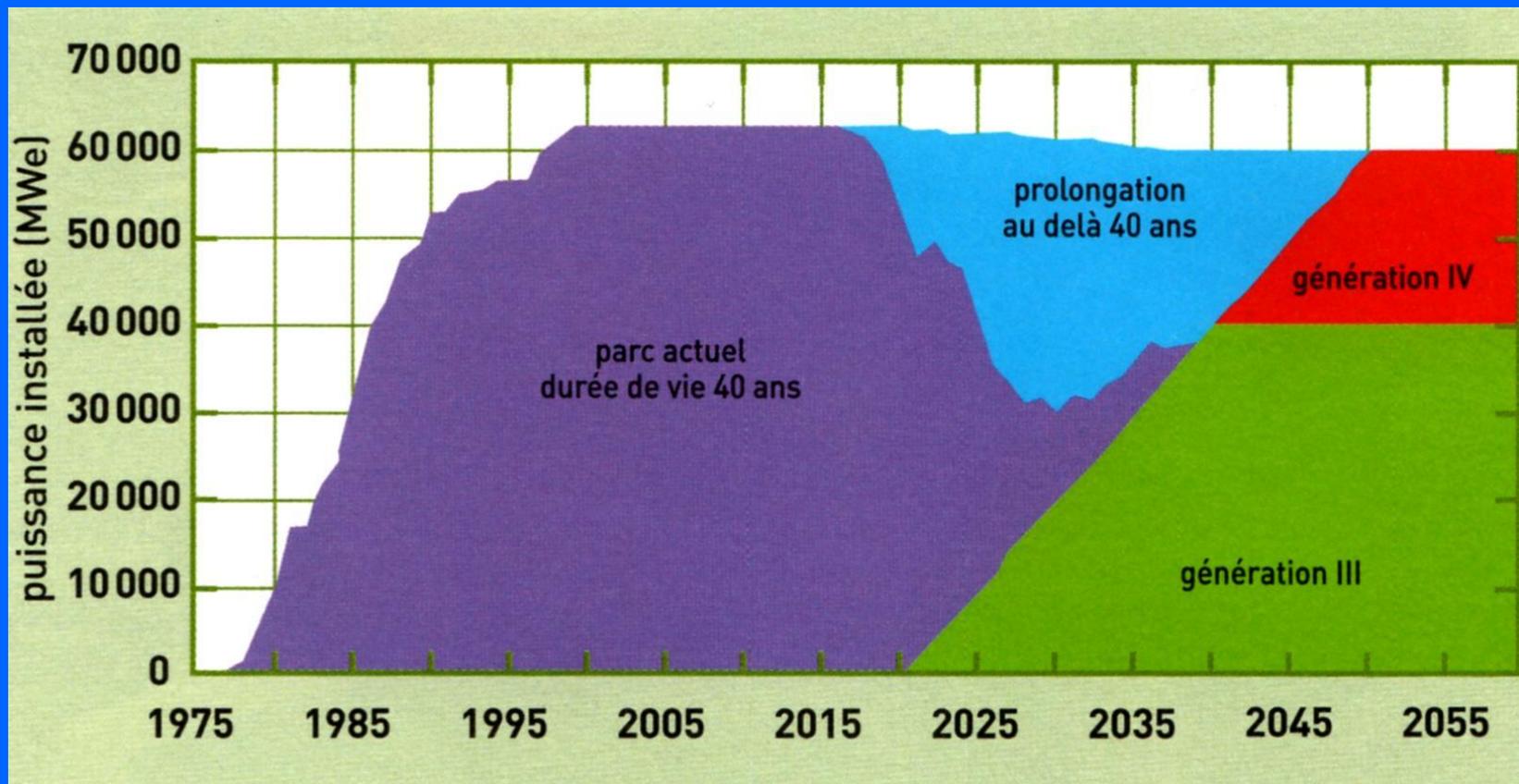
Son image est très controversée et suscite de la part d'une partie de la population (surtout européenne) une forte hostilité (en dent de scie en fonction des incidents...)

Compte tenu de la demande croissante en énergie (doublement d'ici 2050) et du peu d'efficacité des énergies renouvelables, il sera très difficile de s'en passer ! Même si cette énergie, en raison de son manque de souplesse, des coûts élevés d'investissement, ne pourra être que secondaire dans le mix énergétique mondial (par rapport au charbon et au gaz qui resteront prépondérant jusqu'à la fin du siècle).

Compléments

Les réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération

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

auxquels se sont joints la Chine et la Russie...

6 filières ont été retenues :

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)

réacteur à très haute température

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

