

# Les filières

Les réacteurs se différencient par:

- le combustible: U naturel ou enrichi, Pu?
- le modérateur:  $H_2O$ ,  $D_2O$  ou C (graphite) ou neutrons rapides
- le fluide caloporteur:  $H_2O$ ,  $D_2O$  sous pression ou bouillant  
gaz carbonique  
Na liquide

# Autres composantes d'un réacteur

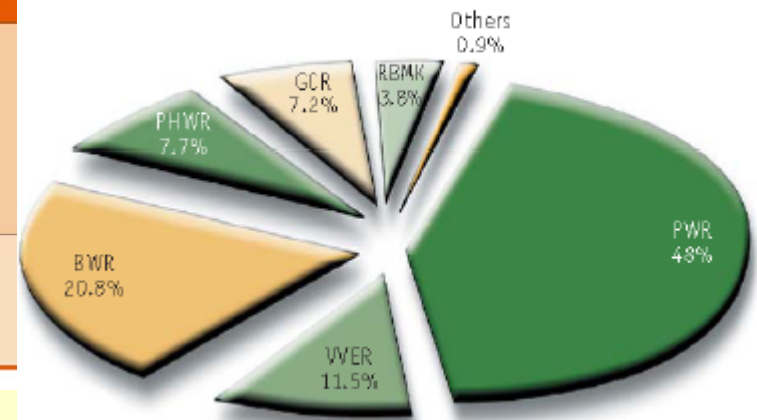
- Barres de contrôles absorbant des neutrons (bore, argent, indium, cadmium, hafnium)
- Le cœur est formé par le combustible et la structure nécessaire à le maintenir
- Réflecteur (souvent le réfrigérant) pour optimiser la réaction entoure le cœur.
- Cœur et réflecteur plongés dans un conteneur en acier (cuve du réacteur) protégé des rayonnements par un bouclier.
- Instruments de mesure pour contrôler le fonctionnement.

## LES DIFFÉRENTES FAMILLES DE RÉACTEURS

FILIÈRES	COMBUSTIBLE	MODÉRATEUR	CALOPORTEUR
<b>Réacteur UNGG</b> (Uranium naturel graphite-gaz)  Première filière développée en France. Tous les réacteurs de cette génération ont maintenant été arrêtés, le dernier en 1994.	Uranium naturel (0,7 % d'uranium 235)	Carbone solide (graphite)	Gaz carbonique
<b>Réacteur CANDU</b> Filière développée au Canada.	Uranium naturel	Eau lourde*	Eau lourde sous pression
<b>Réacteur RBMK</b> ( <i>Reactor Bolchoe Molchnastie Kipiachie</i> ou en français "Réacteur bouillant de grande puissance") Ces réacteurs constituent 40 % du parc nucléaire de l'ancienne Union Soviétique (par exemple, Tchernobyl...).	Uranium enrichi à 1,8 % d'uranium 235	Carbone (graphite)	Eau bouillante
<b>Réacteur à eau bouillante (REB)</b> Filière développée aux États-Unis, au Japon et en Suède	Uranium enrichi à 3 % d'uranium 235	Eau ordinaire entrant en ébullition dans le cœur	
<b>Réacteur à eau sous pression (REP)</b> La filière la plus classique dans le monde occidental. Elle est également développée en ex-URSS sous le nom de "VVER".	Uranium enrichi à 3 % d'uranium 235	Eau sous pression maintenue à l'état liquide. L'eau sous pression est chauffée et le caloporteur.	
<b>Réacteur à neutrons rapides (RNR)</b> La caractéristique de ces réacteurs est qu'ils ne comprennent pas de modérateur: les neutrons restent rapides. Un prototype en France: le réacteur Phénix (250 MWe).	Uranium enrichi ou plutonium	Aucun	

\*Eau lourde: eau constituée de molécules d'eau dont l'atome d'hydrogène est un atome de deutérium, isotope lourd de l'hydrogène (voir livret L'atome).

Figure 2.4: Reactor types in use worldwide (as of 1 January 2003)

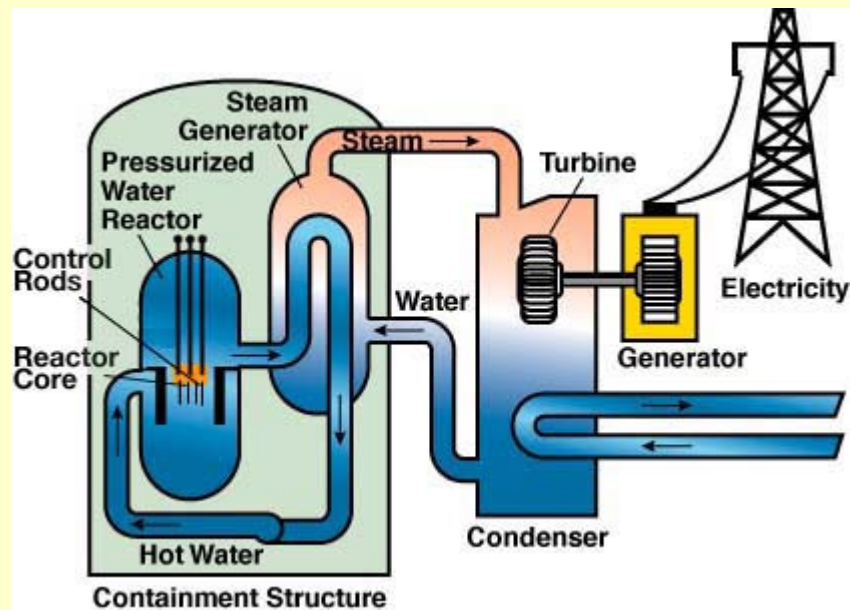


# Principe d'un réacteur nucléaire

Réacteur à eau sous pression.

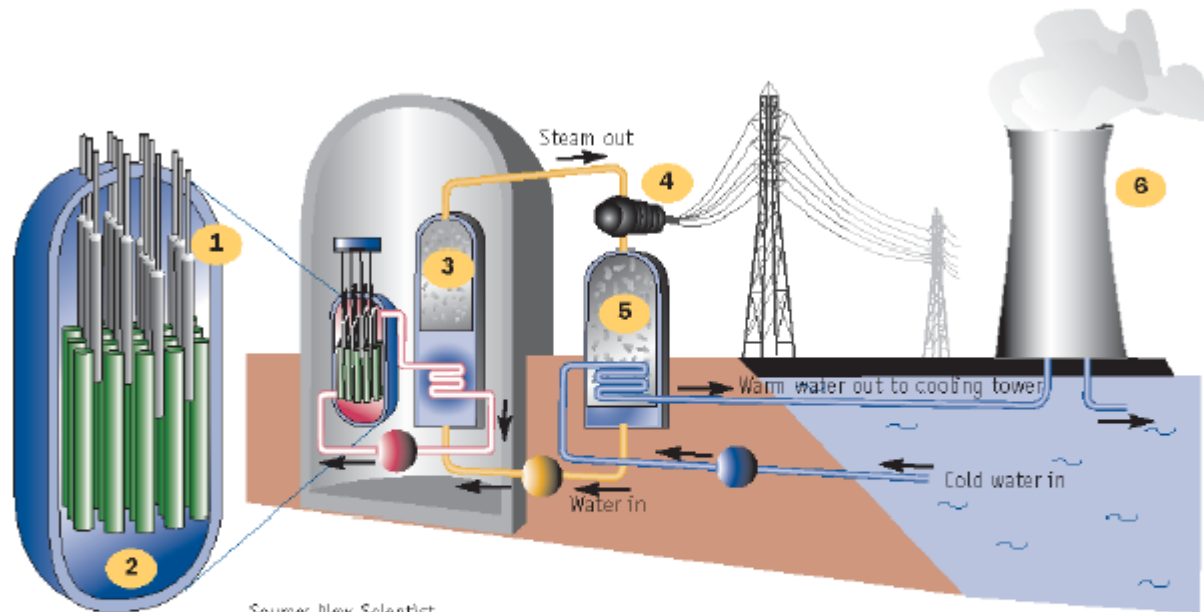
Eau sous pression circule dans la partie confinée pour empêcher qu'elle ne bout ( $T^{\circ} \sim 300^{\circ}$ )

L'eau chaude est pompée dans le générateur de vapeur où l'eau de refroidissement se vaporise et passe dans une turbine conventionnelle.



# Réacteur à haut sous pression

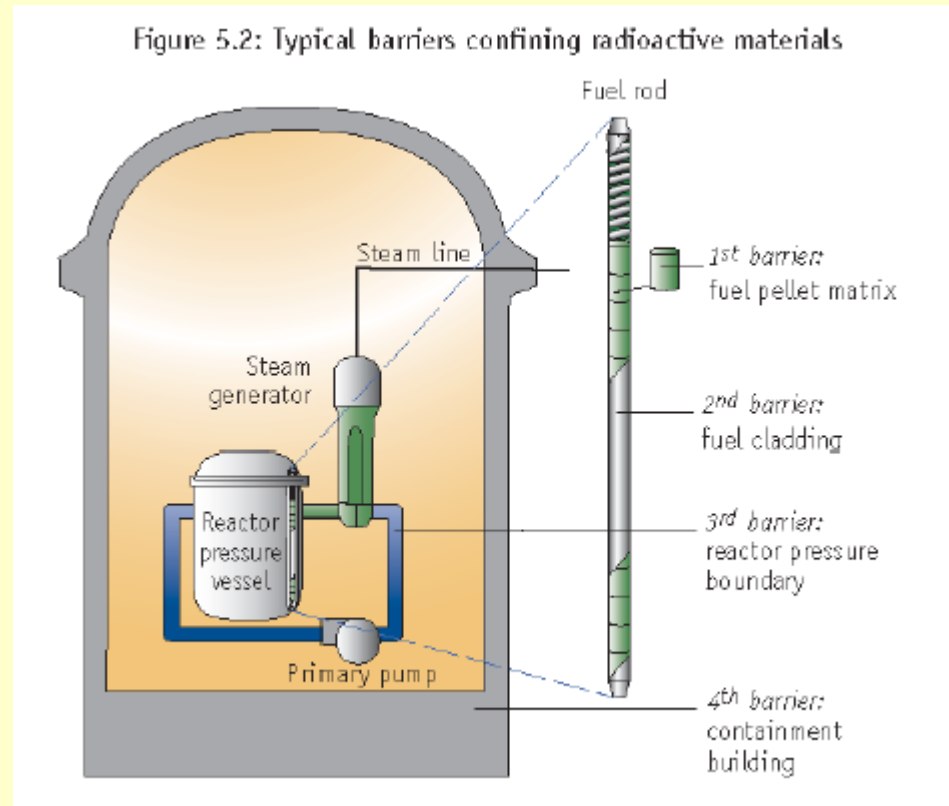
Figure 2.3: Basic components of a nuclear reactor (pressurised)



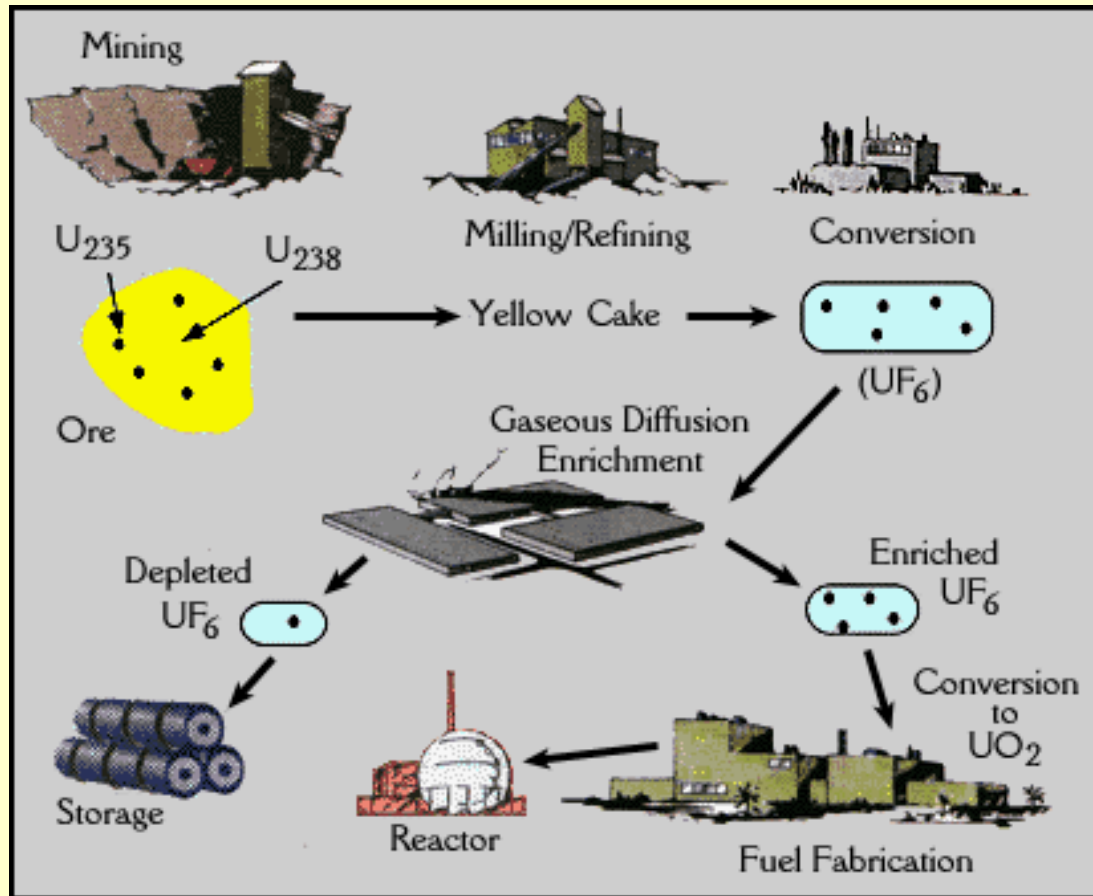
Source: New Scientist.

- 1 – Reactor: fuel (green) heats pressurised water. Control rods (grey) absorb neutrons to control or terminate fission.
- 2 – Coolant and moderator: fuel and control rods are surrounded by water that serves as coolant and moderator.
- 3 – Steam generator: hot water from the reactor is pumped through a heat exchanger to generate high-pressure steam.
- 4 – Turbine generator: steam drives electricity generator to produce electricity.
- 5 – Condenser: removes heat to convert steam back to water.
- 6 – Cooling tower: removes heat to return cooling water to near-ambient temperature.

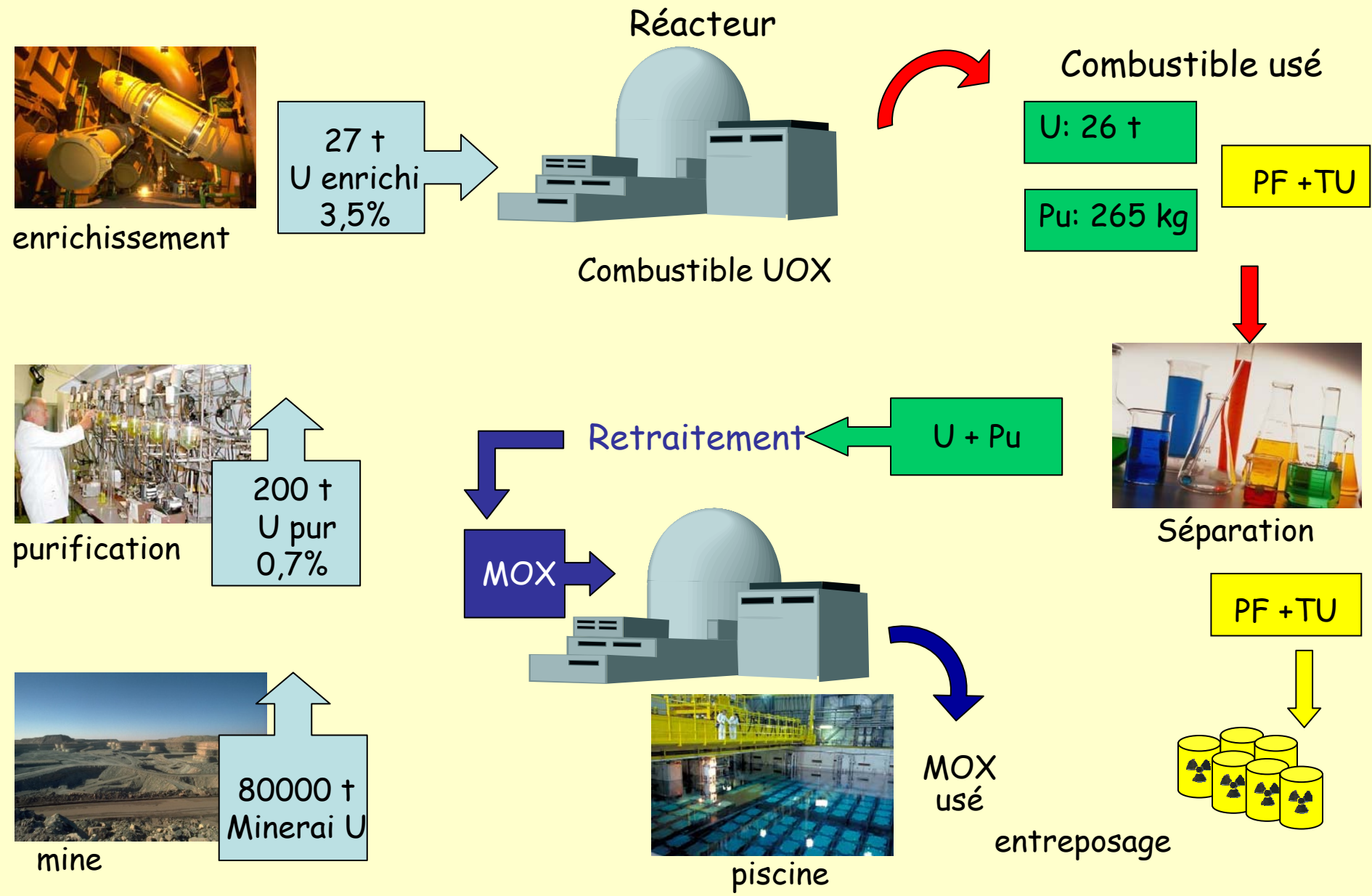
# Les 4 barrières actuelles



# Cycle du combustible



# Cycle annuel du combustible nucléaire pour un réacteur REP de 1000 MWe



# L'extraction



Extraction en mine par des techniques traditionnelles

Réduction du volume par élimination de déchets



Traitement chimique de purification et conversion en  $U_3O_8$  de couleur jaune (« yellow cake »)

Première production de déchets (de 10 à 100 tonnes pour 1t d'U en fonction de la pureté du minerai)

# Enrichissement de l'U

- Transformation de l' $U_3O_8$  en  $UF_6$ : solide à température ambiante mais volatile à une  $t^\circ$  inférieure à l'eau bouillante
- Enrichissement effectué à un petit nombre d'endroits au monde (en principe...)

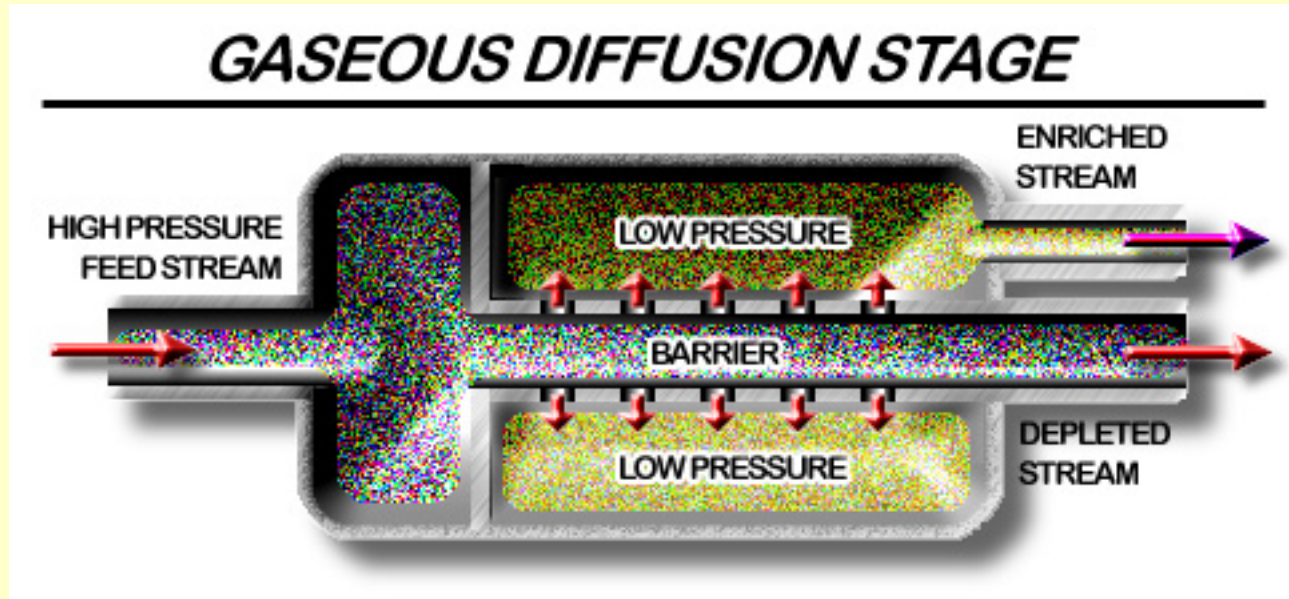
Table 3.2: Major uranium enrichment facilities worldwide

Country	Site(s)	Technology
China	Lanzhou	Centrifuge <sup>1</sup>
	Shaanxi	Centrifuge
France	Tricastin	Gaseous diffusion
Germany	Gronau	Centrifuge
Japan	Rokkasho-mura	Centrifuge
Netherlands	Almelo	Centrifuge
Russia	Angarsk	Centrifuge
	Ekaterinburg	Centrifuge
	Krasnoyarsk	Centrifuge
	Seversk	Centrifuge
United Kingdom	Capenhurst	Centrifuge
United States	Paducah	Gaseous diffusion

1. Under construction.

- Déchets: principalement U appauvri en 235

# Enrichissement de l'Uranium



Il faut augmenter la proportion de  $^{235}\text{U}$  par rapport à  $^{238}\text{U}$   
(de 0.7% à 3.5%)

Un des deux procédés actuels: diffusion gazeuse.

$\text{UF}_6$  est forcé de diffuser sous pression à travers des parois poreuses.

Diffusion (légèrement) plus rapide pour 235 que 238

1000 étapes nécessaires pour passer à 3-4%!

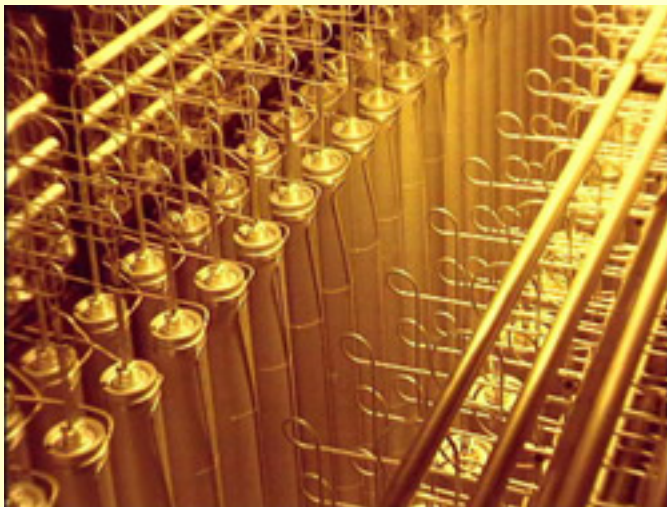
$\text{UF}_6$  solide à  $t^\circ$  ambiante mais devient gazeux vers  $60^\circ\text{C}$

Equipements lourds et consommant beaucoup d'énergie.

$UF_6$  est corrosif et le système doit être exempt de fuites

Autre méthode: centrifugation: rotors cylindriques tournent à très grande vitesse (partie externe à 500m/s)

Difficultés (et prix): matériaux pour la centrifugeuse  
(Ti ou acier spécial)



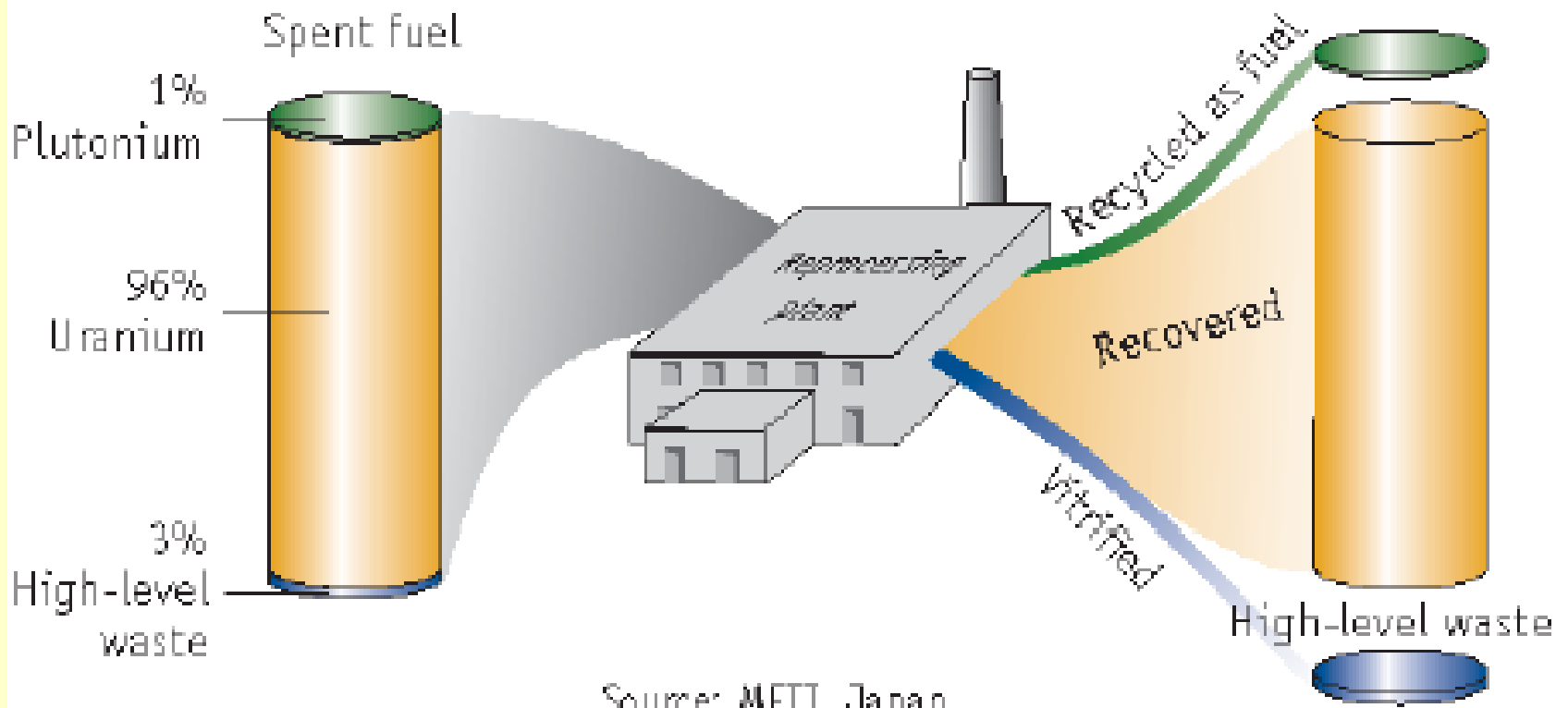
# Assemblage du combustible

- Conversion de  $UF_6$  en  $UO_2$ , poudre pressée et chauffée à haute  $t^\circ$  ( $1400^\circ$ )
- Poudres sous forme de pastilles de la taille d'un dé, cylindrique
- Assemblage dans des tubes métalliques creux (crayons de combustible) de matériaux à haute résistance à la corrosion (acier inox, zirconium) rassemblés en gerbes (4m de haut, 15cm de côtés, 300 kg)
- De l'ordre de 730 assemblages contenant au total environ 46 000 barres de combustible dans un réacteur
- Moins de 10% des réacteurs actuels utilisent un mélange U+Po comme combustible (mais USA et Russie envisagent de recycler le Pu militaire)



# Après utilisation: aval du cycle

Figure 3.2: Composition and reprocessing of spent fuel



# Bilan en masse de la charge d'un réacteur (1GWe an, 4 ans en réacteur)

Isotope	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Bilan (kg)
U4	8	4	-4
U5	883	169	-714
U6	0	114	114
U8	22979	22169	-809
U	23870	22457	-1413
Np7	0	14	14
Pu8	0	6	6
Pu9	0	142	142
Pu0	0	66	66
Pu1	0	41	41
Pu2	0	19	19
Pu	0	274	274
Am	0	6	6
Cm	0	3	3

Injection chaque année de ~24t d'U enrichi à 3.7%

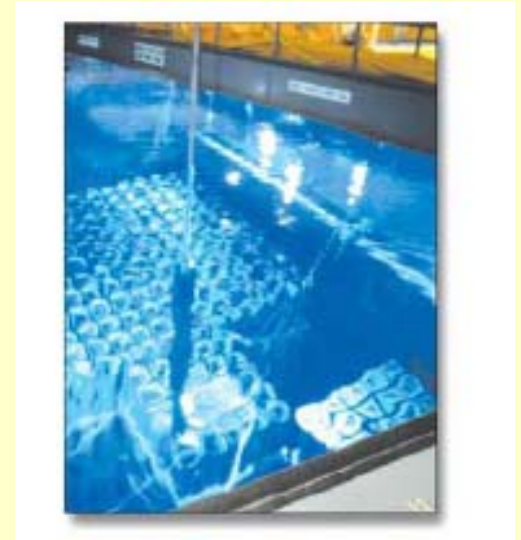
Perte de ~1.1 t de noyaux lourds  
Seuls 700kg de <sup>235</sup>U sont brûlés

Il reste plus de <sup>235</sup>U que dans U naturel!

On a créé des isotopes impairs du Pu  
(qui peut être réutilisé dans le MOX)

# L'aval du cycle

- Combustible usé est retiré du réacteur
- Stocké pour 5-6 ans dans des piscines:  
l'eau filtre les radiations et laisse  
le combustible refroidir
- Ensuite: stockage à long terme  
ou retraitement pour séparer les éléments encore utiles (U et  
Pu) et réduire le volume des déchets



# Les déchets

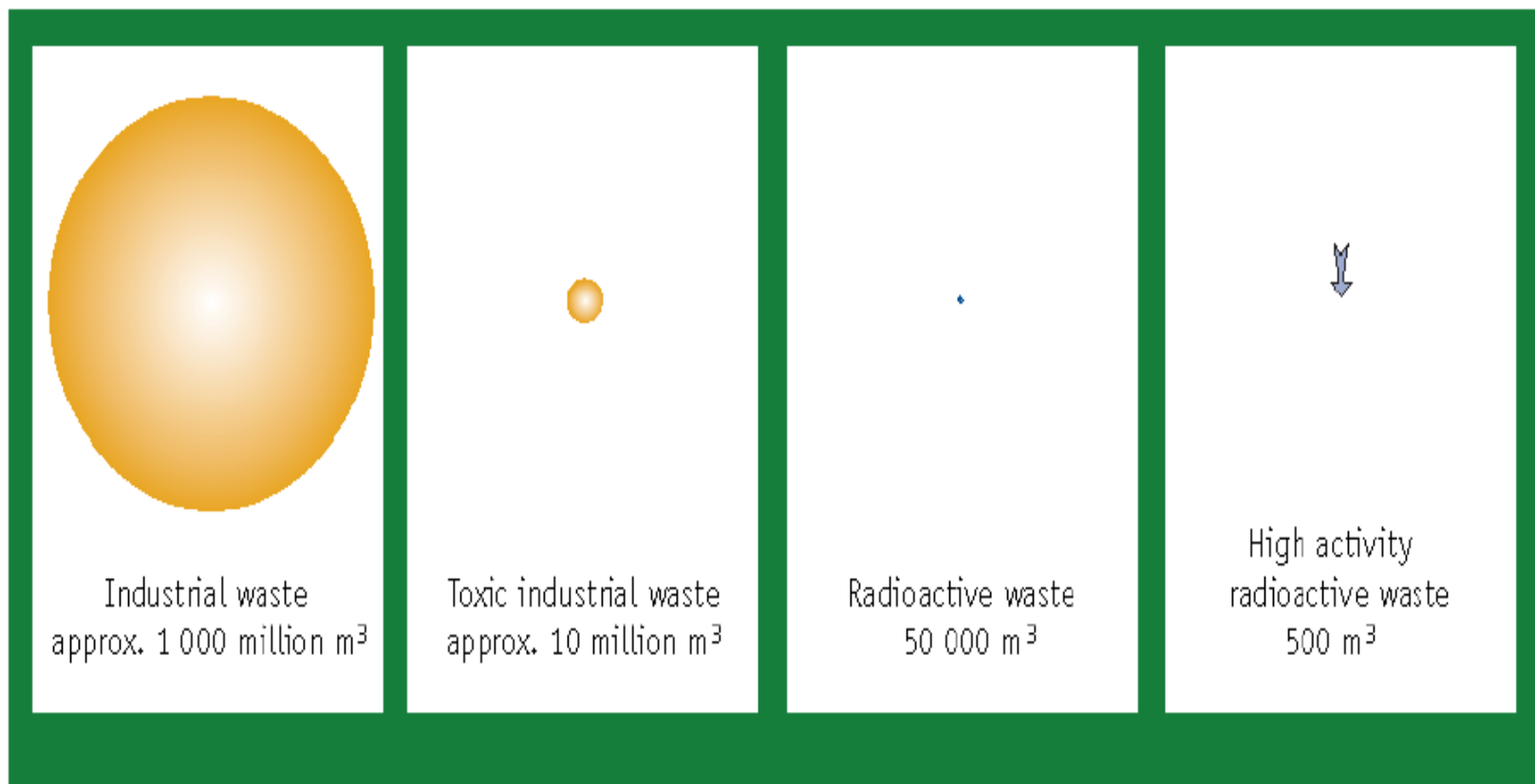
Classés en trois catégories:

- Faiblement radioactifs: soumis à de faibles doses de radioactivités (produits pendant le déclassement de la centrale ou dans d'autres activités nucléaires, seringues, ...); des gants en caoutchouc suffisent pour se protéger
- Moyennement radioactifs: objets industriels (matériaux ayant servi à la préparation du combustible par exemple) Emettent peu de chaleur mais des rayonnements -> protection par des écrans
- Fortement radioactifs: essentiellement les produits de fission ou les actinides mineurs

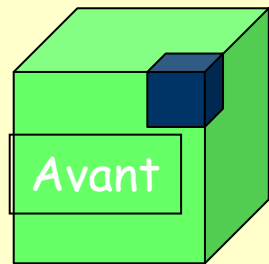
Table 4.1  
Selected HLW isotopes

Isotope	Approximate half-life
Strontium-90	29 years
Caesium-137	30 years
Americium-241	430 years
Americium-243	7 400 years
Plutonium-239	24 000 years
Technetium-99	213 000 years

Figure 4.2: Waste generation comparison – yearly production of waste in the European Union

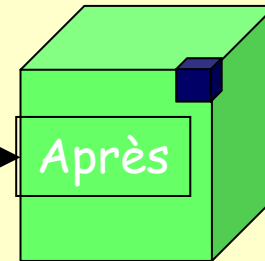


# Inventaire des déchets d'un réacteur 1000 MWe



$^{235}\text{U}$ : 950 kg  
 $^{238}\text{U}$ : 26,3 t

Production d'électricité  
(3 ans)



$^{235}\text{U}$ : 280 kg  
 $^{238}\text{U}$ : 25,7 t



Produits de fission  
945 kg (PFVL 60 kg)



Transuraniens  
Pu: 265 kg  
Np, Am, Cm: 20kg

En France

Pour une production annuelle de 435 TWh:  
1300 t de combustible sont déchargées dont:

~ 12 t de Plutonium  
~ 1 t (Np, Am, Cm)  
~ 3,5 t de PFVL

# Rejets par an et par habitant en Belgique

Industriels: 2,5 tonnes dont 100 kg toxiques

Ménagers: 0,8 tonne

Dioxyde de carbone  $CO_2$  : 6 tonnes

Nucléaires: 1 kg dont 100 g de moyenne et forte activités

# Quels choix pour les déchets radioactifs?

Actuellement, il y a 2 solutions possibles:

Stockage direct du combustible usé (Suède, Etats-Unis)

Retraitement du combustible usé en vue du recyclage de U et de Pu (France La Hague , Japon, Russie, Grande Bretagne)

D'autres voies sont à l'étude

- Transmutation ou incinération des déchets hautement radiotoxiques
- Réacteurs de 4ième génération

# Entreposage (réversible)



Installations d'entreposage des déchets radioactifs de haute activité (déchets vitrifiés et combustibles usés) Zwiilag exploitée depuis 2001 à Würenlingen par la coopérative suisse Nagra/Cedra. La centrale nucléaire de Beznau est en arrière-plan.



Enfouissement dans des couches géologiques très stables et peu perméables

Moyen efficace d'assurer une protection de l'homme et de l'environnement pour plusieurs dizaines de milliers d'années.

Solution étudiée en Finlande, Suède, Allemagne, Etats-Unis, Canada,

Plusieurs laboratoires souterrains depuis une dizaine d'années.

En France, site de construction de laboratoire souterrain dans l'argile à Bure, dans la Meuse, à environ 500 m de profondeur.

# les « accidents » nucléaires

## Activités relâchées en Pbq ( $10^{15}$ becquerels)

	<i>Tchernobyl</i>	<i>Windscale</i>	<i>Three Mile Island</i>	<i>Mayak</i>	<i>Goiana</i>	<i>Essais nucléaires</i>
Césium-137	85	0,04	?	0,03	0,05	1500
Césium-134	54	0,001	?	?		< 1,5
Strontium-90	10	0,00022	?	4		1300
Iode-131	1760	0,75	0,001	?		780 000

## Surfaces en $\text{km}^2$

	<i>Tchernobyl</i>	<i>Windscale</i>	<i>Three Mile Island</i>	<i>Mayak</i>	<i>Goiana</i>	<i>Essais nucléaires</i>
Evacuées	3000	0	(*)	1000	0	
Affectées	28000			15 000	<1	Monde entier

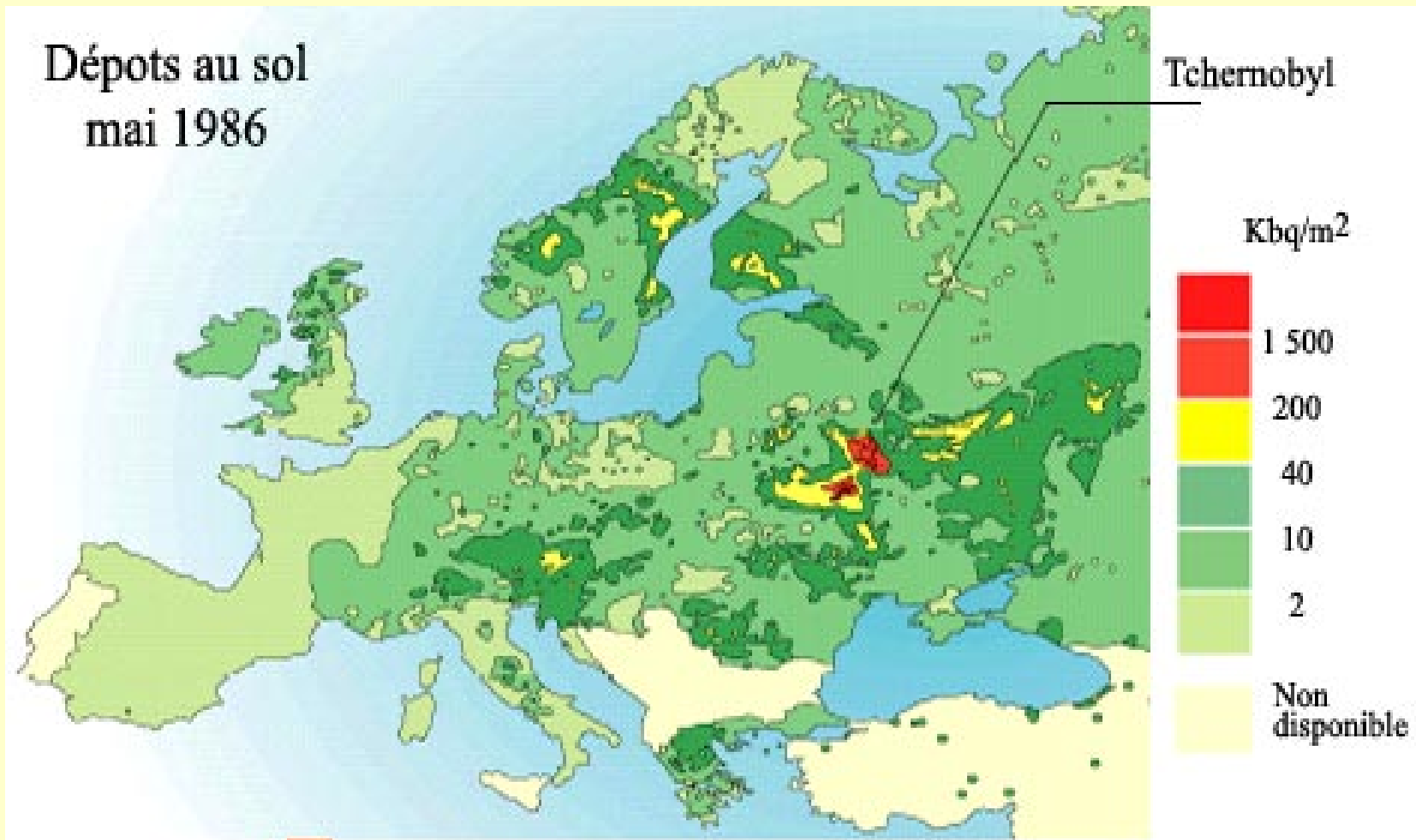
# L'accident de Tchernobyl

- 25 Avril 1986 - mise à l'arrêt du réacteur 4 (accumulation du  $^{135}\text{Xe}$ ) et **décision** de tester l'aptitude de fournir par inertie suffisamment de puissance électrique pour le refroidissement du réacteur en cas de non fonctionnement de la centrale électrique principale et avant le démarrage des unités de secours.
- **pas d'échange d'informations** entre l'équipe chargée du test et celle en charge de la sécurité du réacteur !!!!
- Mauvaise **conception** du réacteur
- niveau **insuffisant** de « culture de sécurité » des opérateurs

# L'accident de Tchernobyl

- actions s'écartant dangereusement des règles de sécurité (suppression des alarmes et des automatismes de sécurité !!!).
- problèmes réels créés par la conception du réacteur, potentiellement instable et susceptible de perte de contrôle en cas d'erreur d'opération.
- Résultat: soudain et incontrôlable pic de puissance (x 100 en 4 s, augmentation rapide de la température amenant une déformation des gaines de barres de contrôle), destruction presque totale du réacteur après fusion du cœur. Cet accident a été aggravé par l'incendie du graphite (modérateur) qui a aidé à la dispersion des substances radioactives.

# $^{137}\text{Cs}$



Durée de vie: 30 ans, émetteur  $\beta^-$ , permet de mesurer le renouvellement des nappes phréatiques  
Contamine le lait maternel, effet toxique sur le foie et le rein.

# Vocabulaire : de G-I à G-IV

Premières réalisations



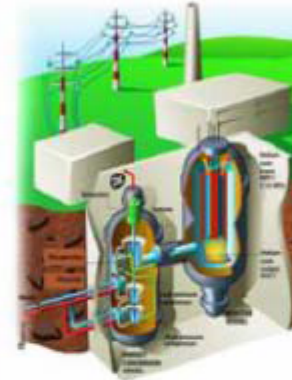
Réacteurs actuels



Réacteurs avancés



Systemes du futur

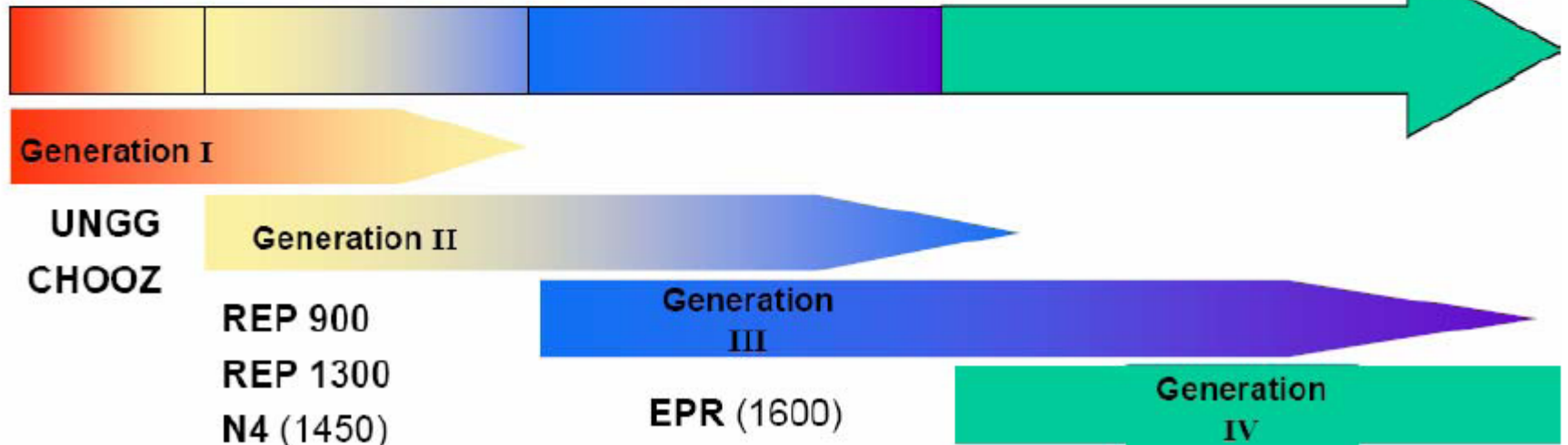


1950

1970

2010 ?

2045 ???



# Génération III en (très) bref

Réacteur conçu dans les années 1990, intégrant l'expérience de la génération II

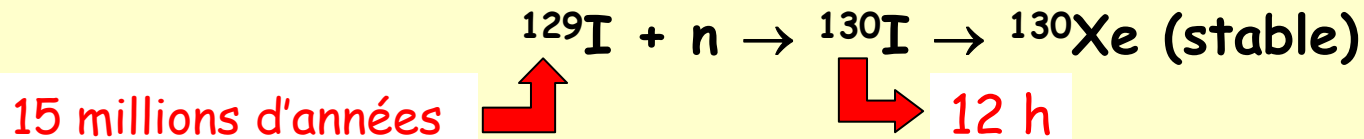
- Amélioration de la sécurité (enceintes, contrôle,...)
- Puissance plus élevée (1600 GWe)
- Durée de vie allongée (60 au lieu de 40 ans)
- Taux de combustion du  $^{235}\text{U}$  plus élevé
- Masse  $\text{U}_{\text{nat}}$  réduite de 15%
- Réduction de 10% des actinides à vie longue par kWh produits

# Génération IV et déchets

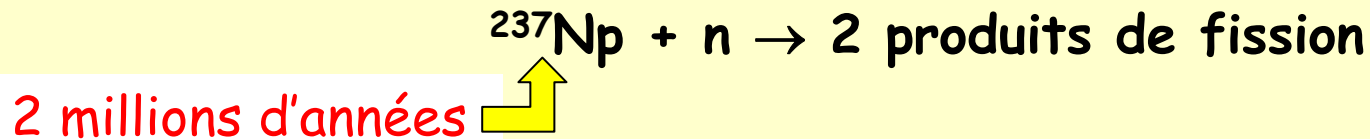
Principe: bombarder avec des neutrons rapides les noyaux radioactifs jugés trop dangereux à long terme pour les transformer en noyaux stables

Outils: réacteur sous critique assisté par accélérateur ou réacteur critique à neutrons rapides

## TRANSMUTATION



## INCINERATION



# Réacteurs de 4ième génération

R et D international regroupant 11 pays

- compétitivité économique
- sûreté des réacteurs
- minimisation des déchets
- économie des ressources
- non prolifération



Médiocre usage fait de l'uranium  
seul l' $^{235}\text{U}$  (0,7%) fissionne dans les REP  
Conséquence sur la quantité d'uranium naturel nécessaire  
( 70000 t/an) et sur le niveau des réserves (120 ans)

# Solutions possibles

- On exploite tout l'uranium

RNR (réacteurs à neutrons rapides)

surgénérateurs:  $^{238}\text{U}$ (fertile)/ $^{239}\text{Pu}$ (fissile)

100 fois moins de déchets que dans les réacteurs actuels

- On utilise du thorium

Réacteurs sels fondus (neutrons lents)

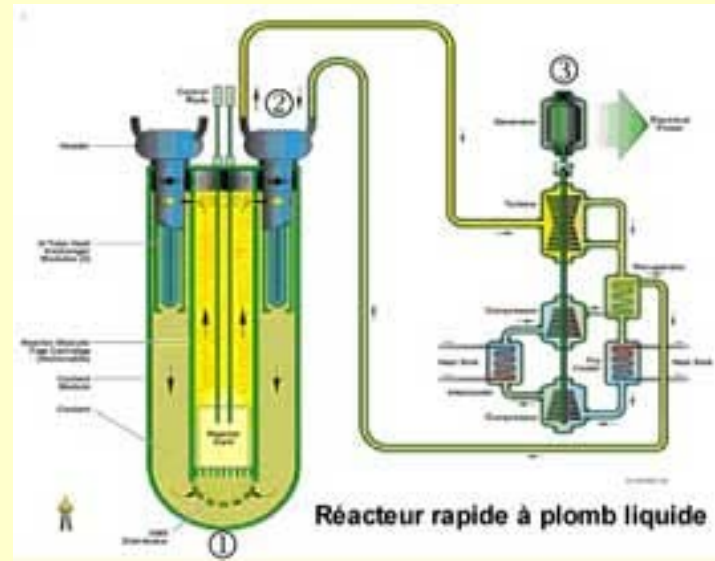
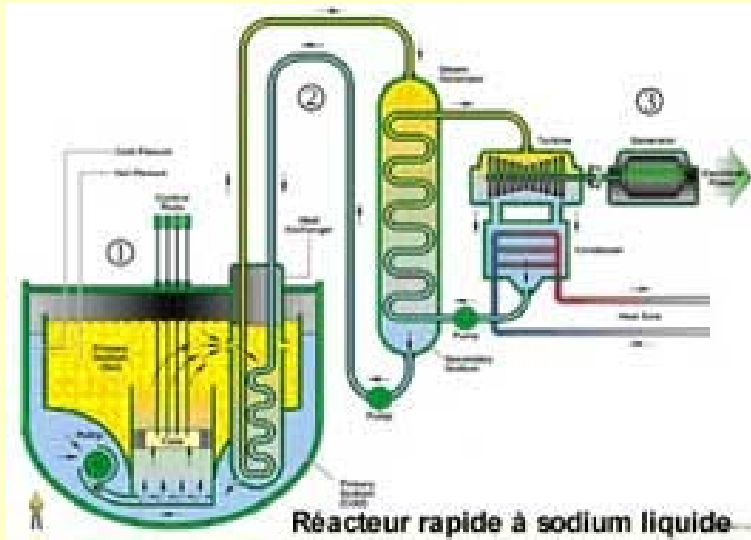
régénérateurs:  $^{232}\text{Th}$ (fertile)/ $^{233}\text{U}$ (fissile)

1000 fois moins de déchets que dans les réacteurs actuels



Réserves supérieures à 20000 ans !!!!!

# Réacteurs de 4<sup>ème</sup> génération



Plusieurs schémas à l'étude

# The MYRRHA concept (SCK·CEN, Mol, Belgium)

Accelerator (600 MeV proton, 2.5 mA)



Sub-critical reactor

ADS "Accelerator Driven System"

Spallation source  
(proton → neutron)

Neutron multiplier

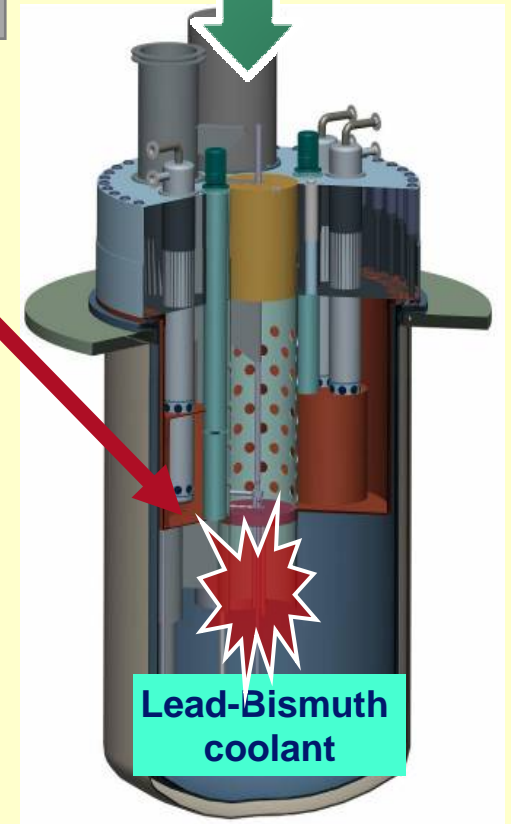
Fast  
neutron  
source

Flexible irradiation facility

Waste transmutation

Material testing

others: RI, NTD-Si,...



# The MYRRHA concept

Accelerator (600 MeV proton, 2.5 mA)

Sub-critical reactor



0.1 mA

Ruggedized target:  
e.g. Ta, UC/C

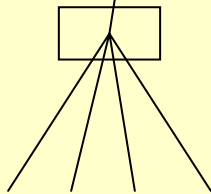
**Sustainable 1+ ion source:**  
Surface Ionization, ECR, RILIS

[ISOL@MYRRHA](http://ISOL@MYRRHA)

High-resolution  
mass separator

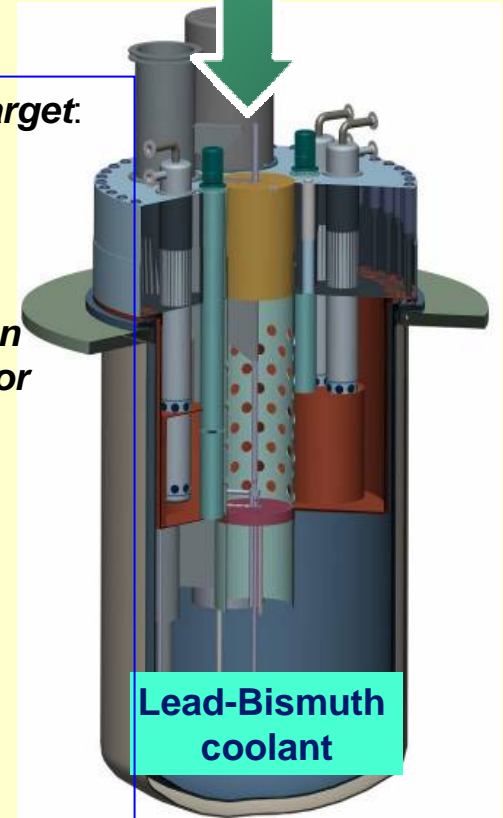
RFQ cooler and  
buncher

Low-resolution  
mass separator



**Experiments:**

- Nuclear physics
- Condensed Matter
- Atomic physics
- Fundamental Interactions
- Life science



# Quelques éléments sur les dangers

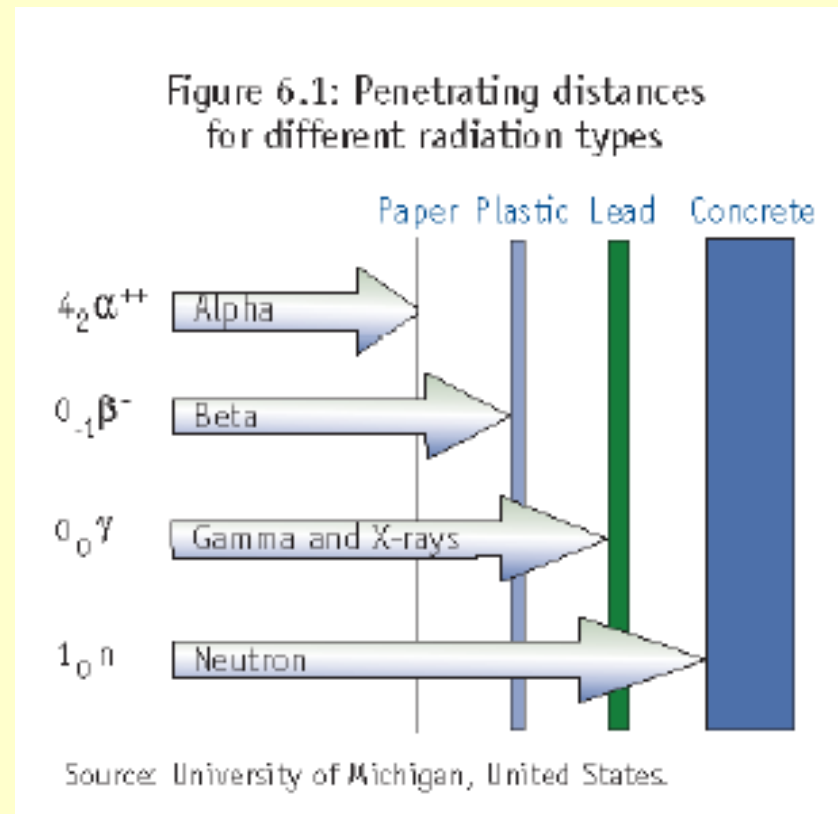
Plusieurs éléments à prendre en compte:

- Le type de rayonnement
- Son intensité (faibles doses?)
- Le type de tissu qui est irradié
- Le total des doses reçues (en une fois ou en plusieurs fois)
- La normalité

# Unités en radioprotection

- radioactivité: 1 désintégration /s = 1 becquerel (Bq)  
1 Ci (Curie) = 37 GBq
- dose absorbée: énergie cédée à la matière (aux tissus) par unité de masse: gray (Gy) = 1J /kg  
1 Gy = 100 rad
- Dose équivalente:  $H_T = W_R D_{TR}$  en Sv (sievert)  
 $W_R$  facteur de pondération radiologique  
 $D_{TR}$  énergie déposée par le rayonnement R dans le tissu
- Dose efficace:  $E = S W_T H_T$   
 $W_T$  facteur de pondération tissulaire

# Absorption des radiations



# Facteurs de pondération radiologiques

- Photons, toutes énergies :  $Q = 1$
- Électrons et muons, toutes énergies :  $Q = 1$
- Neutrons,
  - énergie  $< 10$  keV  $Q = 5$
  - $10$  keV  $<$  énergie  $< 100$  keV  $Q = 10$
  - $100$  keV  $<$  énergie  $< 2$  MeV  $Q = 20$
  - $2$  MeV  $<$  énergie  $< 20$  MeV  $Q = 10$
  - énergie  $> 20$  MeV  $Q = 5$
- Protons, énergie  $> 2$  MeV :  $Q = 5$
- Particules alpha et autres noyaux atomiques :  $Q = 20$

# Facteurs de pondération (tissus)

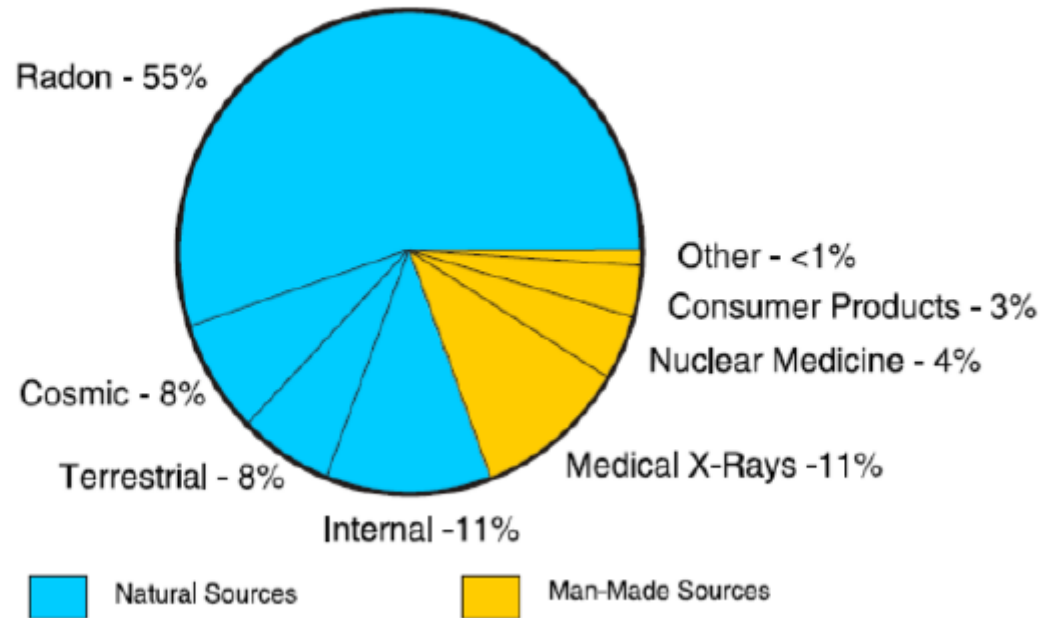
- Gonades :  $N = 0,20$
- Estomac, gros intestin, moelle osseuse, poumon :  $N = 0,12$
- Cerveau, œsophage, foie, muscles, pancréas, petit intestin, rate, rein, sein, thyroïde, utérus, vessie :  $N = 0,05$
- Peau, surface des os :  $N = 0,01$

# Exposition des populations

- Moyenne mondiale: 4 mSv / an  
dont 2.4 mSv / an dus à la radioactivité naturelle
- Première cause: le radon (Rn) 0.55 mSv /an
- Autres causes:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{14}\text{C}$  présents dans le corps humain, 0.20 mSv /an
- Rayonnement cosmique (0.3 mSv /an au niveau de la mer)
- Surplus dû aux irradiations médicales

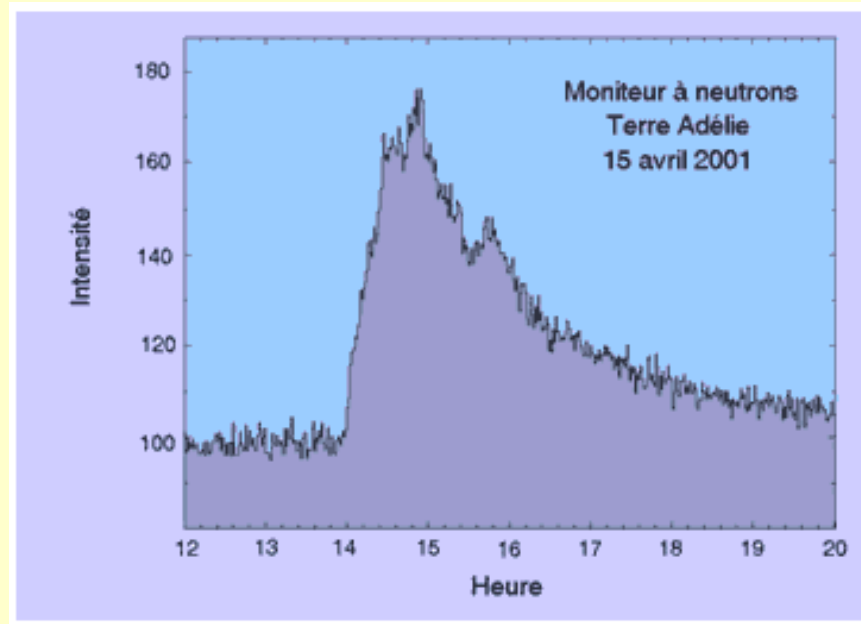
# Origine des irradiations naturelles et humaines (USA)

**Sources of Radiation Exposure  
in the United States\***



\* Source: National Council on Radiation Protection (NCRP) Report 93, 1987.

# Variabilité de l'activité solaire



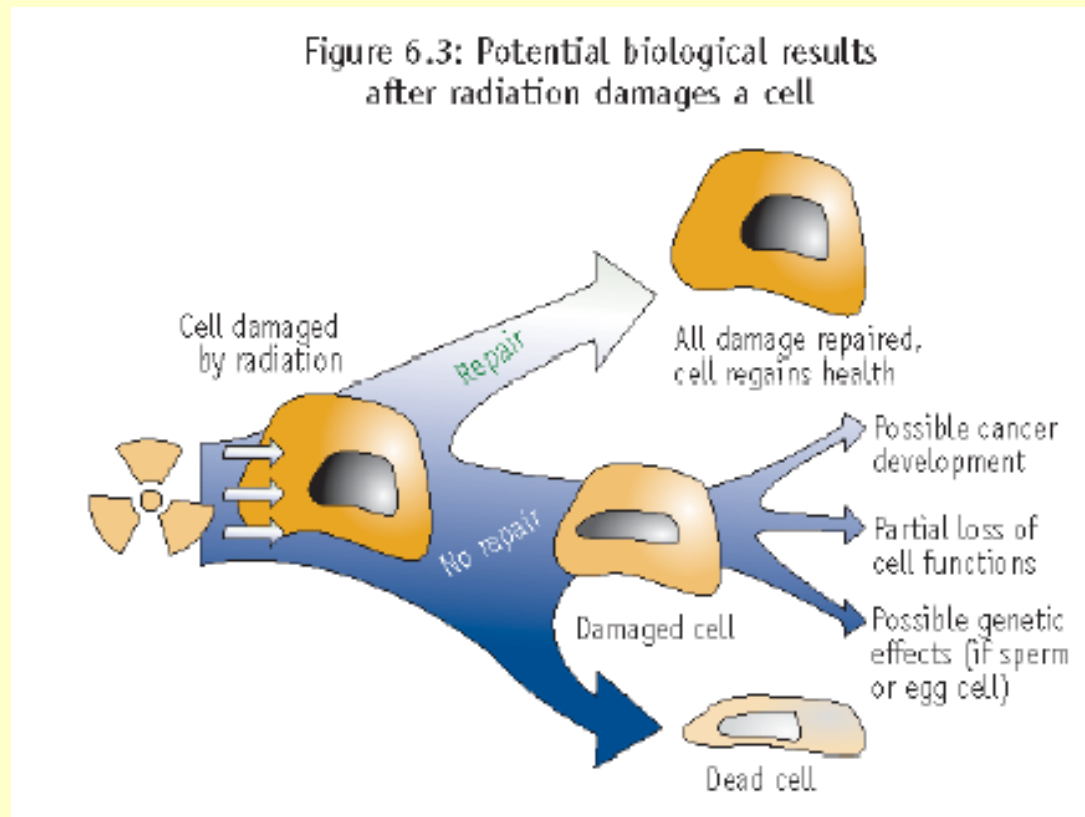
*Mesure des particules secondaires reçues au sol dans les régions polaires, lors de l'éruption solaire du 15 avril 2001. Axe vertical: augmentation par rapport au niveau du rayonnement cosmique avant l'éruption. La montée du flux de particules est rapide : moins d'une heure ici.*

*Source : IPEV et Observatoire de Paris*

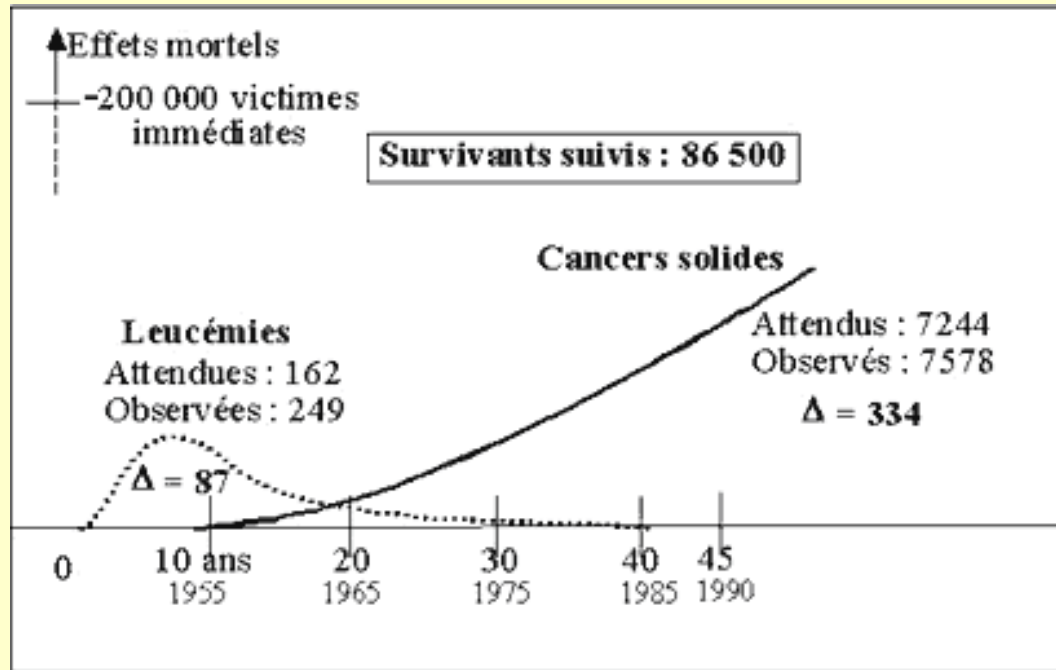
# Effets des irradiations

- Doses les plus élevées: effets immédiats apparaissant après quelques heures ou jours
- Doses plus faibles: effets aléatoires (statistiques) probabilités déterminées uniquement par des études épidémiologiques à long terme.
- Difficulté: pas de cancer spécifique aux irradiations
- Comparaison nécessaire avec une population « saine »
- Impossibilité de mettre en évidence les effets des faibles doses.

# Effets d'une radiation sur les cellules



# Effets des radiations



Mortalité par cancer suite à Hiroshima et Nagasaki  
Comparaison à une population similaire qui n'a pas subi d'irradiation

Les victimes immédiates sont mortes essentiellement  
à cause des effets mécanique et thermiques de l'explosion.  
Doses reçues de 0 à 3 Gray en une fois

# Danger d'une exposition (photons)

- En dessous de 200 mGy: aucun effet mis en évidence
- jusqu'à 1500 mGy: lésions cutanées, rougeurs, pouvant aller jusqu'à la nécrose
- au delà de 1500 mGy: début du syndrome d'irradiation aiguë: fatigue, anorexie, chute de numération sanguine
- à partir de 5000 mGy: céphalée, diarrhées, (1 chance sur 2 de survie)
- à partir de 8000 mGy: fièvre, prostration, dose mortelle

# Principaux radioéléments toxiques

- $^{131}\text{I}$ : durée de vie courte (8 jours)  
produit en grande quantité, migre dans le lait, légumes verts  
se fixe sur la thyroïde (cancer)  
remède: saturer la thyroïde en iode stable
- $^{129}\text{I}$ : durée de vie longue, pas de danger pour la thyroïde mais  
déchet important
- $^{137}\text{Cs}$ : 30 ans, se fixe dans les argiles. Transmis à l'homme par  
animaux et  
végétaux dans masse musculaire. Période biologique: 30j
- $^{90}\text{Sr}$  : 30 ans. Transférés à l'homme par voie animale et végétale  
(lait).  
Squelette et cancer des os. Période biologique: 2500j

- émetteurs alpha ( $^{241}\text{Am}$ , isotopes du Pu): squelette
- $^{222}\text{Rn}$  : pas toxique directement mais par ses descendants (aussi émetteurs alpha).  
Inhalation et cancer du poumon (en mines). Faibles doses?
- $^3\text{H}$ : 12 ans, usines de retraitement et militaire.  
Faible radiotoxicité ( $\beta$  de 18keV, parcours de quelques microns).  
Exposition interne par eau tritiée, élimination après une dizaine de jours.  
Boire pour accélérer l'élimination

# Le nucléaire a de nombreuses autres applications

- Physique fondamentale: en particulier, test des propriétés de 3 interactions fondamentales
- Médecine: irradiation de tissus malades  
imagerie
- Analyse des surfaces
- Traçage
- Datation
- Militaire...



Pays	Stratégique	Non-Stratégique	Opérationnelle	Total
Russie	2,600	2,050	4,650	12,000
USA	2,126	500	2,626	9,400
France	300	?	~300	300
Chine	180	?	~180	240
GB	160	?	<160	185
Israël	80	?	?	80
Pakistan	70-90	?	?	70-90
Inde	60-80	?	?	60-80
Corée du Nord	<10	?	?	<10
Total	~5,600	~2,550	~7,900	~23,300