

Sommaire

Quelques notions de base.

Les réacteurs nucléaires actuels (IIIe génération)

Avantages/désavantages

Utilisation de l'uranium

Gestion des déchets

Les surgénérateurs (IVe génération)

La Fusion (Ve génération)

Introduction

Réactions exothermiques

Fission nucléaire :



Gaz naturel (combustion) :



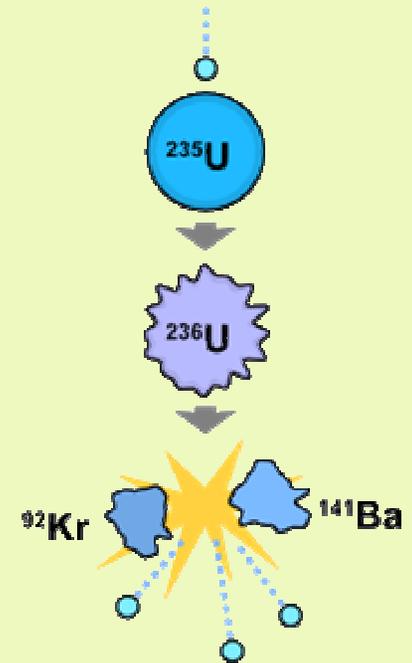
conditions...

France : électricité 1000W / hab

fission uranium = 1 gramme

combustion CH₄ = 1 tonne

L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée !



Notation

Dans un atome :

Z = nombre atomique (nombre de protons dans le noyau et charge électrique)

A = masse atomique (protons + neutrons)

Exemple : $^{12}\text{C}_6$ et $^{14}\text{C}_6$ (isotopes)

ou C-12 et C-14 (les mêmes)

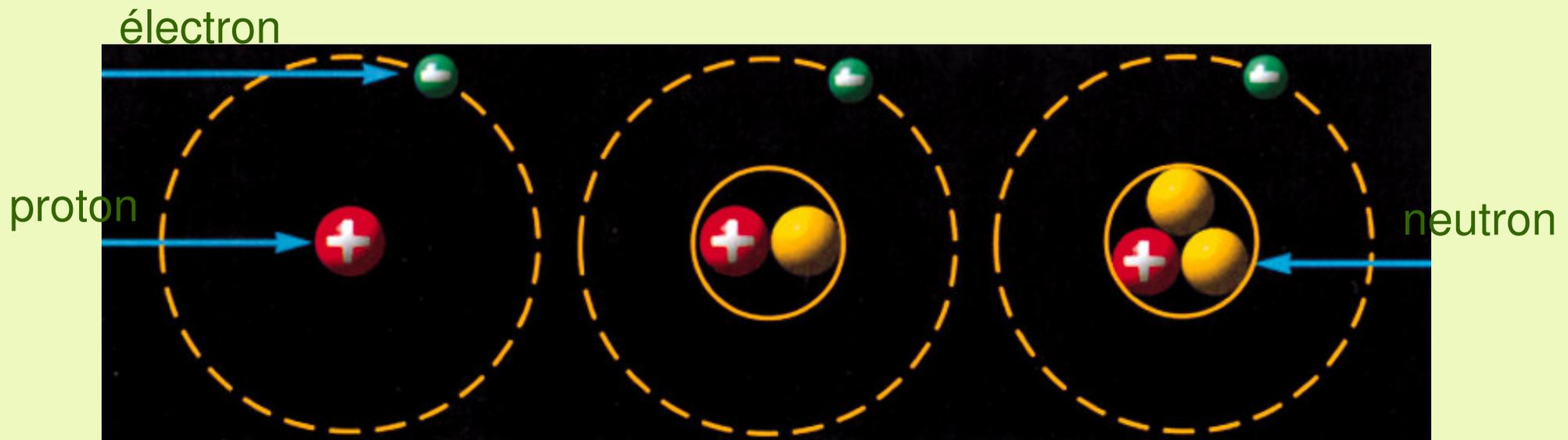
ou C(12) et C(14)

Isotopes de l'Atome d'Hydrogène (Z=1)

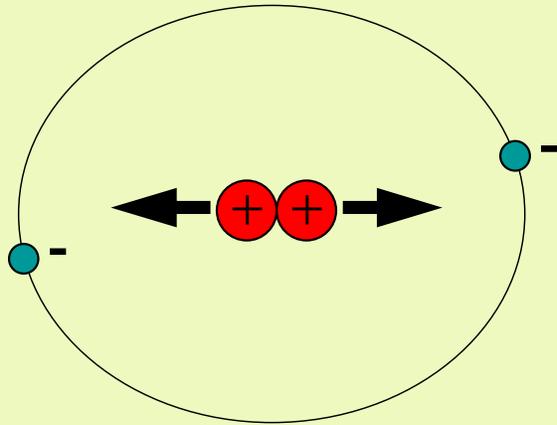
Hydrogène
(${}^1\text{H}_1$)

Deutérium, D
(${}^2\text{H}_1$)

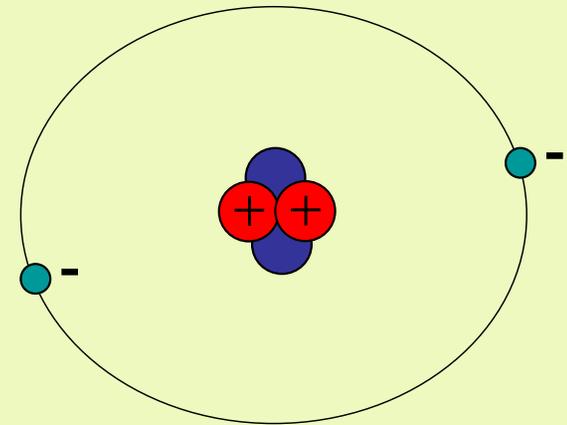
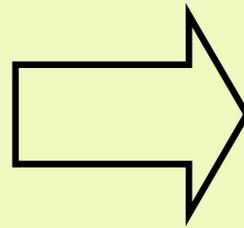
Tritium, T
(${}^3\text{H}_1$)



La force nucléaire Hélium ($Z = 2$)



Hélium...
(ne tient pas !)



Hélium
 ${}^4\text{He}_2$

	Proton
	Neutron
	Électron

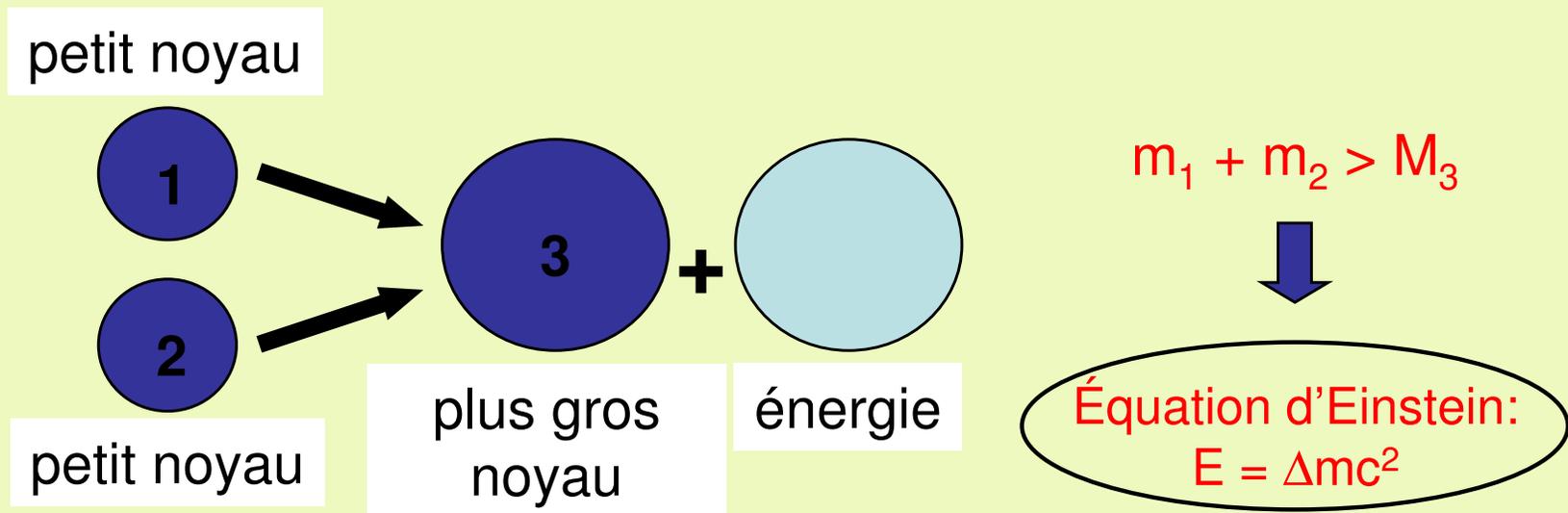
Produits du Big Bang :

Hydrogène (75%)

Hélium (25 %)

Et ça produit de l'Énergie !

Les réactions de **fusion** peuvent être exothermiques: elles dégagent plus d'énergie que celle nécessaire aux réactions mêmes.



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

Énergie de liaison d'un nucléon dans un noyau d'atome

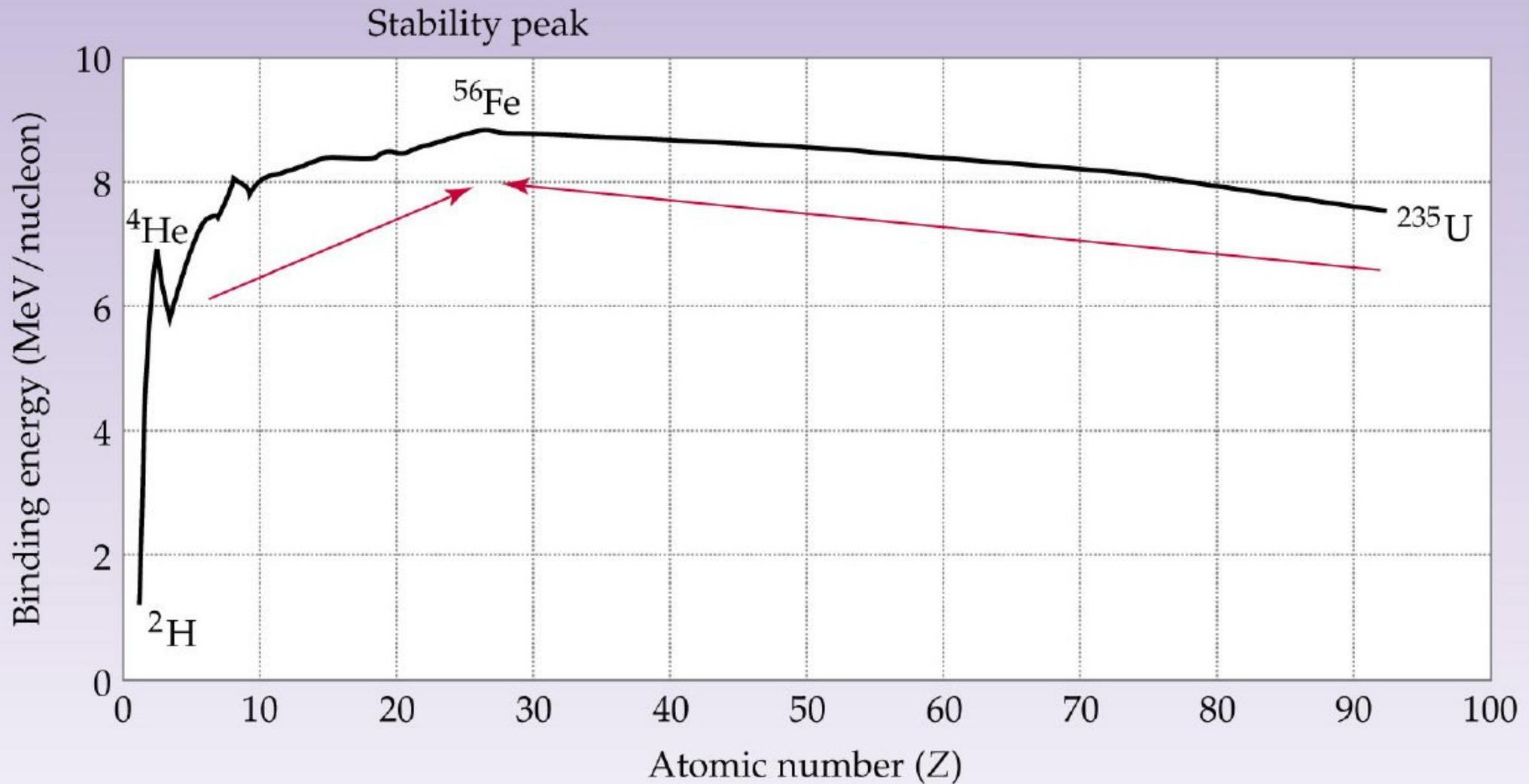
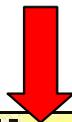


Tabella periodica degli elementi

1 H 1.0079																	2 He 4.0026						
3 Li 6.940	4 Be 9.02											5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984	10 Ne 20.17						
11 Na 22.991	12 Mg 24.32																	13 Al 26.9815	14 Si 28.0855	15 P 30.9737	16 S 32.06	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.100	20 Ca 40.08	21 Sc 44.9558	22 Ti 47.90	23 V 50.9415	24 Cr 51.996	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.71	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.735	32 Ge 72.59	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80						
37 Rb 85.48	38 Sr 87.63	39 Y 88.9058	40 Zr 91.22	41 Nb 92.9064	42 Mo 95.94	43 Tc 98.9062	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.4	47 Ag 107.868	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30						
55 Cs 132.91	56 Ba 137.36	57 La 138.905	72 Hf 178.49	73 Ta 180.947	74 W 183.85	75 Re 186.207	76 Os 190.2	77 Ir 192.22	78 Pt 195.09	79 Au 196.966	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)						
87 Fr 223	88 Ra 226.05	89 Ac (227)																					



Lantanidi

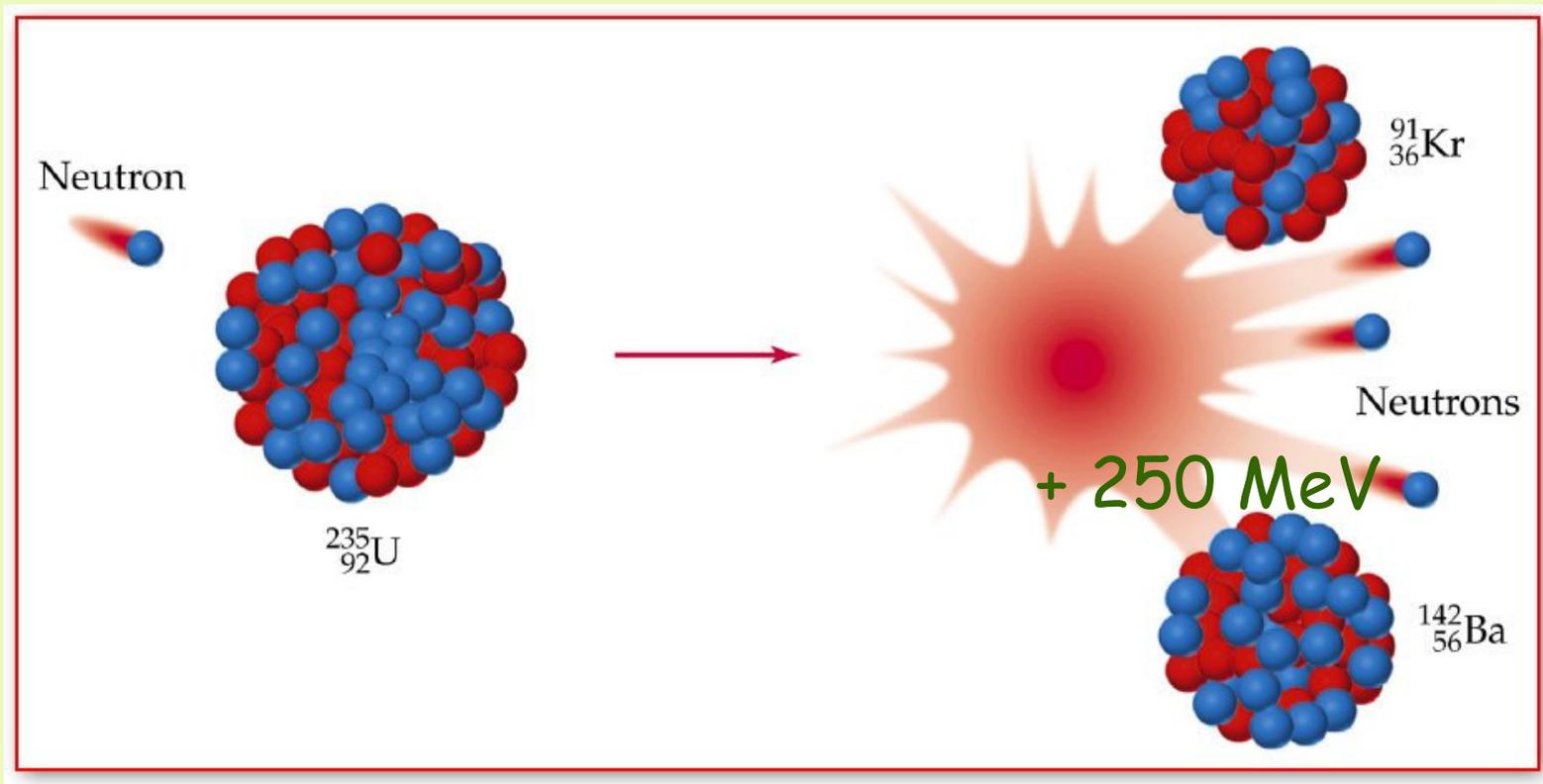
58 Ce 140.12	59 Pr 140.907	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.4	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.50	67 Ho 164.930	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.96
---------------------------	----------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	---------------------------

Attinidi

90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np 237.048	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)
----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

- Metalli alcalini**
- Metalli alcalino-terrosi**
- Metalli**
- Metalli di transizione**
- Terre rare**
- Non metalli**
- Alogeni**
- Gas nobili**

La fission de U(235) et Pu(239)

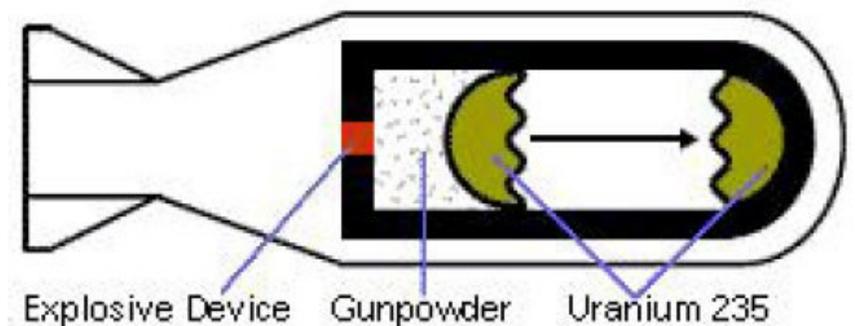


Neutrons thermiques $< 2 \cdot 10^{-2}$ MeV ; Neutrons rapides 0.1 à 6 MeV

Le nucléaire a mal commencé (projet Manhattan 1942)

Une bombe comme celles de 1945 (~ 20 kiloton)

- la masse critique:
U(235) = 56 Kg (un "ballon" R = 11.5 cm)
- Pu(239) = 11 Kg (un "ballon" R = 8 cm)



L'histoire

1932 E. Chadwick découvre le neutron.

1938-39 En Italie et Allemagne on étudie la capture de neutrons par les noyaux lourds.

L'idée de la fission passe de Lise Meitner à N. Bohr et aux USA.

1939 Trois physiciens hongrois, Leo Szilard, E. Wigner et E. Teller convaincent A. Einstein à écrire au président Roosevelt.

Deux jours avant Pearl Harbour, le projet Manhattan est lancé.

1942, 2 déc. E. Fermi active la première "pile atomique".

1945, 16 juillet, première explosion atomique à Alamogordo. Quelques scientifiques regrettent d'y avoir contribué.

6 août 1945 Bombe sur Hiroshima

Quelques jours après, bombe sur Nagasaki. Le Japon se rend.

1949 première bombe russe.

1952 première bombe anglaise.

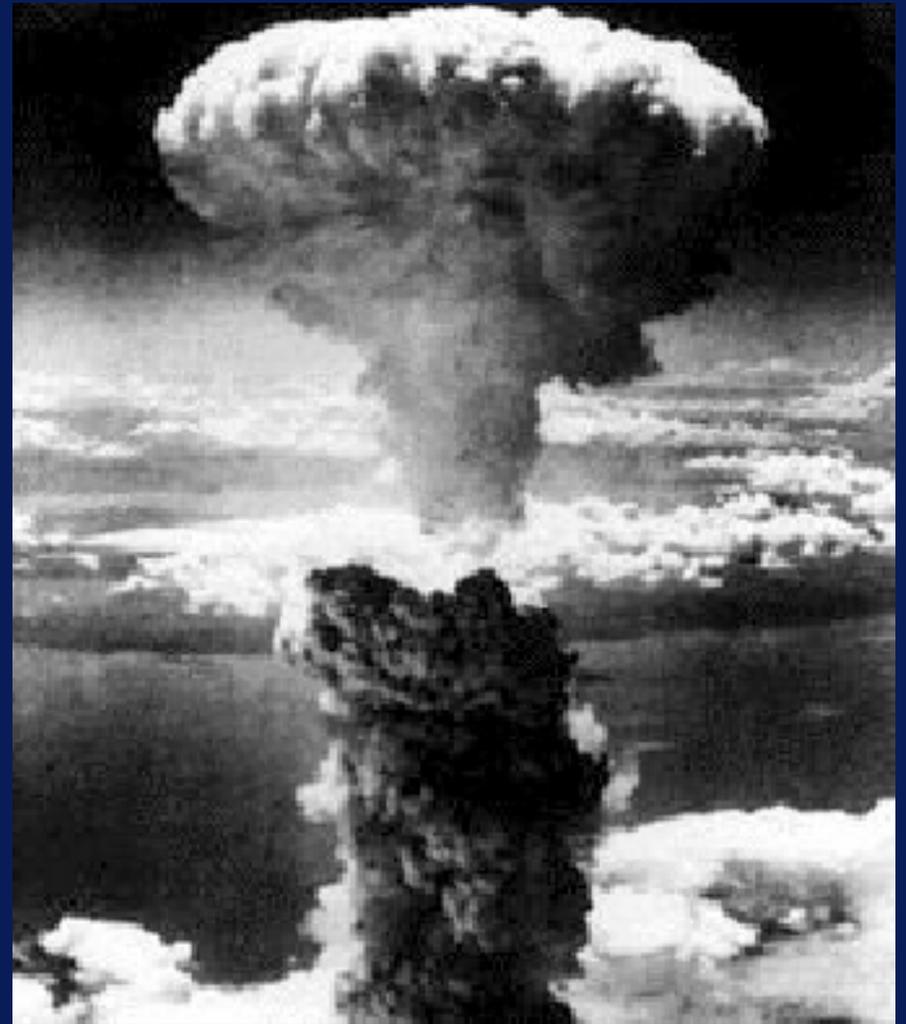
1960 première bombe française.

1974 première bombe en Inde

Etc. Etc.

Hiroshima 6 août 1945
Nagasaki 9 août 1945

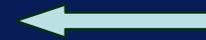
- 160 000 morts
- capitulation du Japon le
14 août 1945
- Life Span Study (LSS) :
100 000 survivants
- 90 % des survivants
encore en vie en 1991



effets cancérigènes des rayonnements (fin 90)

cancers solides

- 50.113 personnes
4.687 décès par cancer
339 excès de décès



- relation dose-effet linéaire

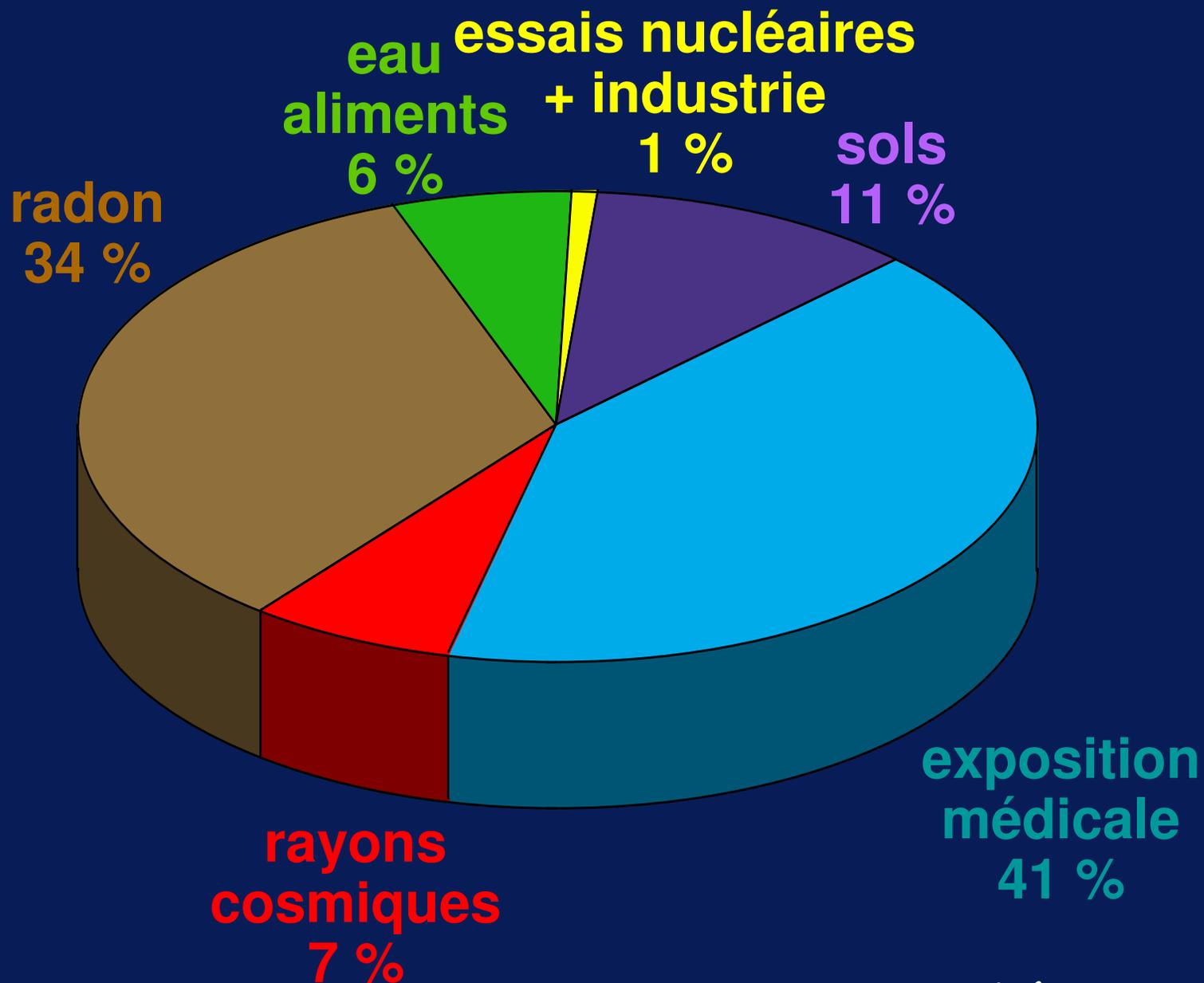
leucémies

- 50.113 personnes
249 cas de leucémie
176 décès par leucémie
87 décès en excès



- relation dose-effet linéaire quadratique

irradiation naturelle et médicale



Dresde, 13 février 1945 à 22h - sans cibles stratégiques

800 bombardiers Lancaster lances des milliers de bombes et 650.000 pièces incendiaires; 2.660 tonnes en tout.

Le 14-02 : 300 avions américains lances 771 tonnes de bombes sur la ville déjà en flammes.

15-02 à 4h du matin : 200 avions américains lâchent 460 tonnes de bombes - ils s'arrêtent à cause de la pluie et de la neige.

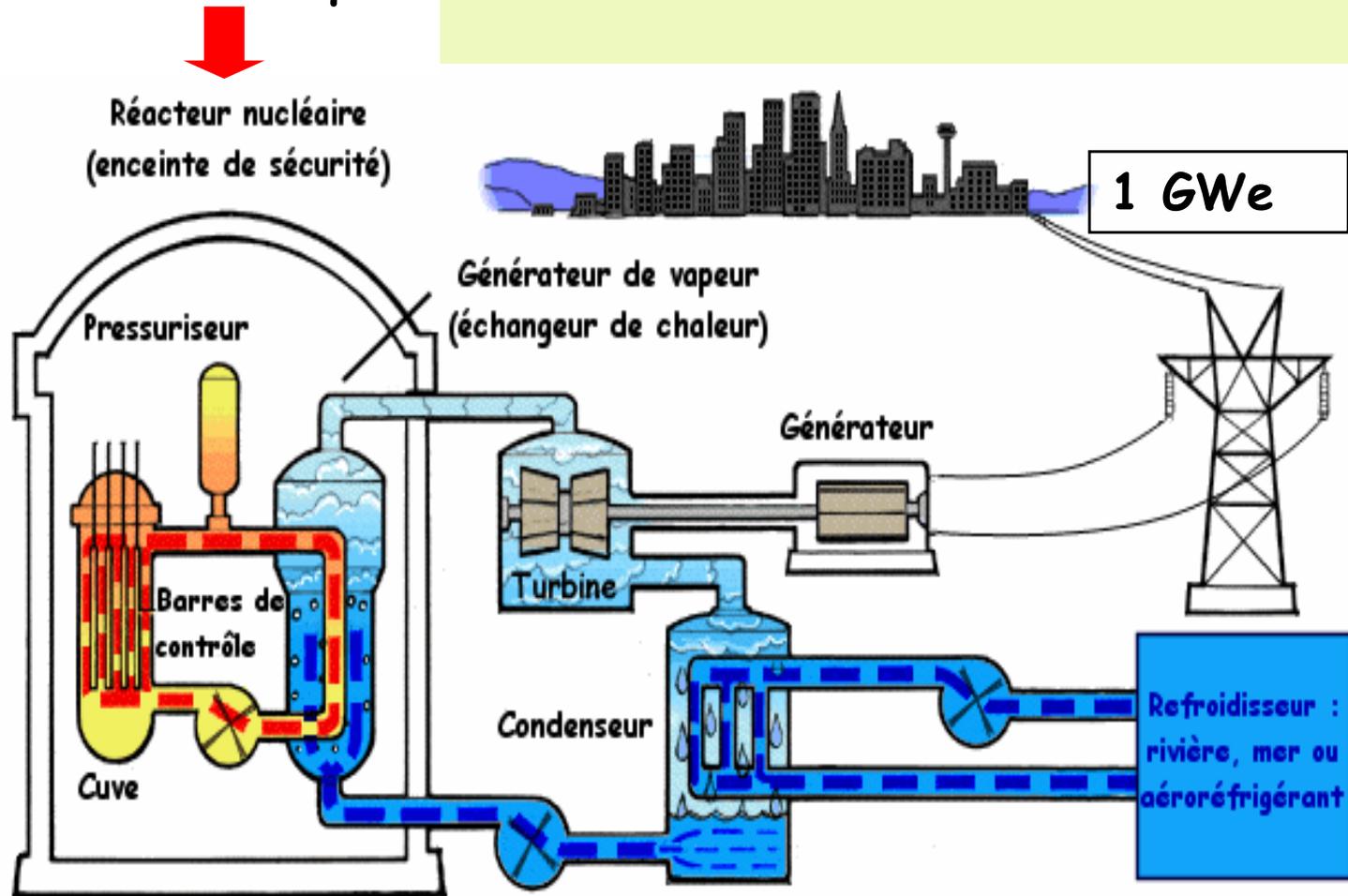
Il y aura 245.000 morts en trois jours, deux fois plus qu'à Hiroshima et Nagasaki réunies.

Les réacteurs nucléaires actuels (IIIe génération)

Le réacteur PWR (le modèle le plus utilisé en France)

Deux circuits d'eau : primaire (155 bar et 345 °C) et Secondaire : vapeur => turbine/génératrice => condenseur

3 GW thermiques



L'énergie nucléaire actuelle

Actuellement, seul l'isotope 235 de l'uranium est utilisé
Il représente seulement 0.7% du minerai d'uranium (99.3%²³⁸U)

Consommation	Uranium fissionné	1 tonne	/(GWe.an)
	Uranium enrichi	30 tonnes	/(GWe.an)
	Uranium naturel	200 tonnes	/(GWe.an)
Réserves Uranium (RRA+RSE+spéculatives)		16 - 23 millions de tonnes	!!!
Production nucléaire mondiale		285 GWe	(ég. pleine puissance)
Potentiel de production (au taux actuel)		280 - 400 ans	!!!

Un nucléaire significatif en 2050 nécessite d'améliorer
considérablement l'utilisation du minerai → recours à la surgénération

(Durée de demie-vie : U-238, 4.7 G-ans; U-235, 0.7 G-ans)

En France

59 centrales de 0.9 à 1.6 GW, réparties en 19 sites.

Production :

60 GWe /an

Soit 78% de la production d'électricité.

1 GWe ~ 1 Million d'utilisateurs

Coût d'une centrale: 2-3 G€

Coût du minerai : 140 \$ / kg

Enrichissement : 500 \$ / kg

Recharge annuelle d'un réacteur :

$165 \text{ T} * 140 \text{ \$/kg} + 500 \text{ \$/kg} *$

$30 \text{ T} = 50 \text{ M\$}$

Vente de l'électricité : 400 M€

En France

- Électricité 1000 W / hab
Fission uranium = 1 gramme
Combustion CH₄ = 1 tonne
- L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée !
- Les déchets sont recyclés (seul pays avec le Japon).
- La France fait cavalier seul, avec 77 % de l'électricité produite par le nucléaire, mais a arrêté le développement des futures générations (Superphénix).
- On n'a pas décidé du stockage final des déchets.
- On a tout misé sur la Fusion, qui si tout va bien ne sera pas utilisable avant 2060-2080.

Que faut-il pour produire 1 GWe ?

Avec la technologie d'aujourd'hui :

120 tonnes d'uranium naturel (U-238 avec 0.7 % de U-235)

ou

2.700.000 tonnes de charbon

ou

2.000.000 de tonnes de pétrole (50.000 camions de 40 T)

ou

2.4 Gm³ de gaz naturel

ou

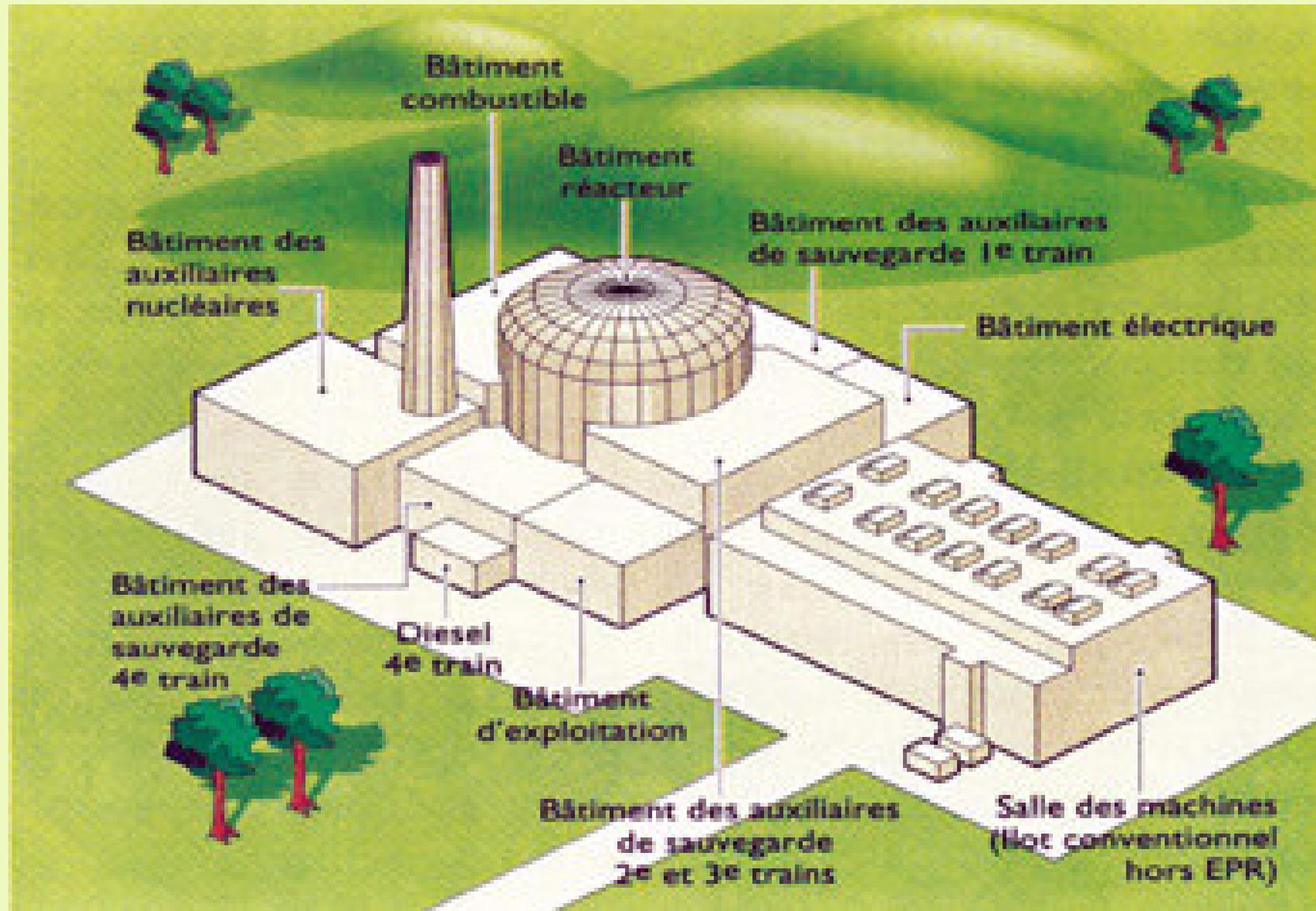
5000 éoliennes de 200 kW (côtes de la mer du Nord)

ou

100 km² de panneaux photovoltaïques (rendement 10%)

120 tonnes d'Uranium naturel (97.3% de U-238, 0.7% de U-235) → **22 tonnes d'Uranium enrichi** (3.5% de U-235) → 1 tonne de U-235 brûlé en 12 mois.

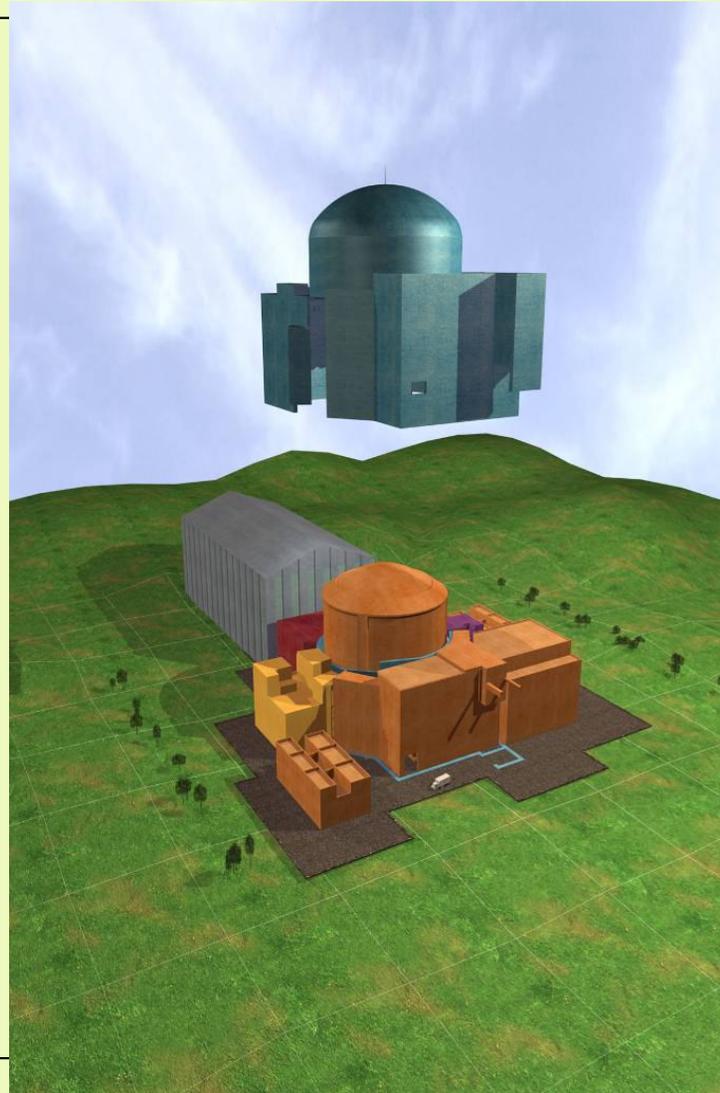
EPR - vue d'artiste



Les systèmes de sûreté sont installés dans 4 bâtiments séparés (redondance 4)



Protection contre la chute d'avion



Réacteurs actuels

Par méconnaissance ou par partis pris, l'industrie nucléaire a coalisé contre elle la crainte de toutes les technologies mal connues

Les centrales ont été arrêtées en Angleterre, Italie, Allemagne, etc. (et les mines d'uranium en France et en Europe ont été fermées).

Au même temps, des dizaines de nouvelles centrales sont planifiées en Chine, Inde, USA, Russie.

La prolifération de centrales nucléaires pose des problèmes de sécurité, techniques et politiques (Iran, Corée du Nord).

Les avantages des réacteurs nucléaires actuels (IIIe génération, eau pressurisée)

- Stockage facile du combustible. (Relative) indépendance énergétique.
- Compacts et puissants (→ 1.6 GWe, 4 GWth)
- Bon rapport prix/production (2-3 G€ pour 40-60 ans de fonctionnement à pleine puissance)
- Très bon niveau de sécurité (sauf les russes RBMK à coeff. de température positif → Tchernobyl)

Tchernobyl, 1986

Le réacteur de la tranche no 4 est de type RBMK (réacteur de grande puissance à tubes de force). De par sa conception, son coefficient de vide est positif (contrairement aux réacteurs plus récents) : si des bulles se forment dans le fluide caloporteur, la réaction tend à s'emballer. D'autre part, l'utilisation du graphite comme modérateur le rend inflammable lorsque la température augmente trop. Enfin, le système d'arrêt d'urgence du réacteur est particulièrement lent (20 secondes).

En plus de ces problèmes de conception, la construction de la centrale a été réalisée sans respecter les normes établies. Un rapport confidentiel de 1979, signé par le président du KGB Iouri Andropov et cité par Nicolas Werth[1], souligne : « Divers chantiers de construction réalisant le bloc no 2 de la centrale atomique de Tchernobyl mènent leurs travaux sans aucun respect des normes, des technologies de montage et de construction définies dans le cahier des charges.»[2]

En 1983, l'« acte de mise en exploitation expérimentale » du réacteur n°4 de la centrale de Tchernobyl est signé alors que « Toutes les vérifications n'avaient pas été achevées. »

Désavantages de la IIIe génération

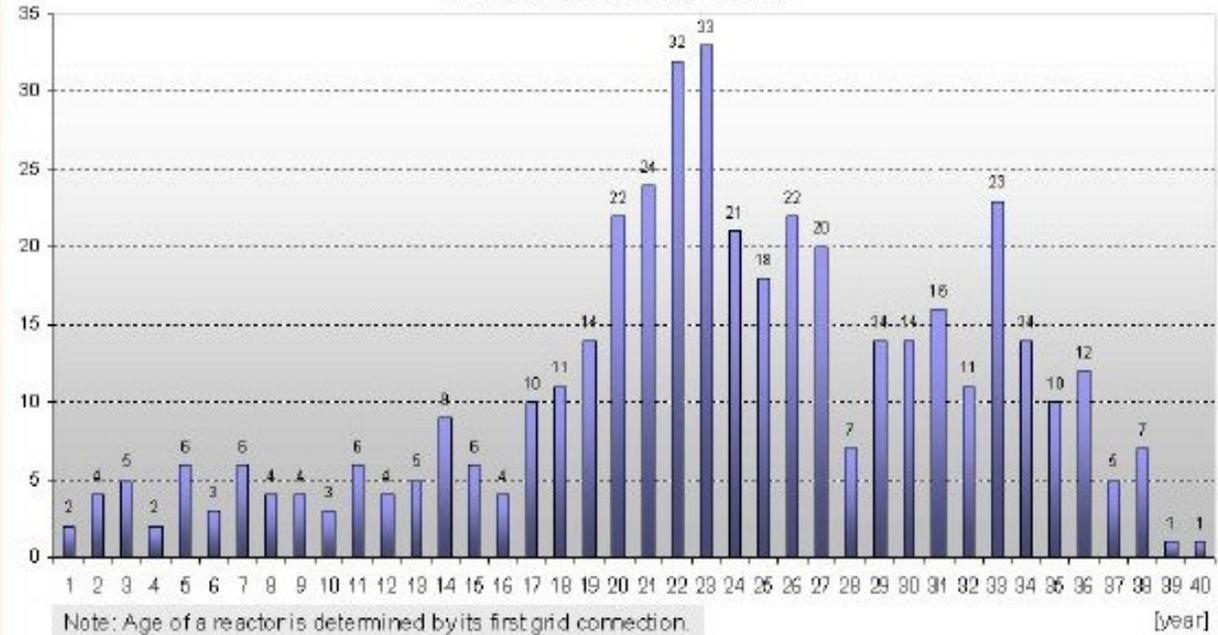
- Utilisation inefficace de l'uranium naturel (99.3 % de U-238, 0.7 % de U-235), enrichi à 3 % de U-235.
- Pour 600 kg de U-235 'brûlé' en 1 année, 20 tonnes de déchets nucléaires (recyclés seules en France et au Japon).
- Éloignement forcé des centres de consommation.
- Démantèlement compliqué : 25 ans et 15 % du coût de la centrale.
- Danger d'utilisation militaire (U-235 et Pu-239).
- Danger d'attentats.

Désavantages et défauts (suite)

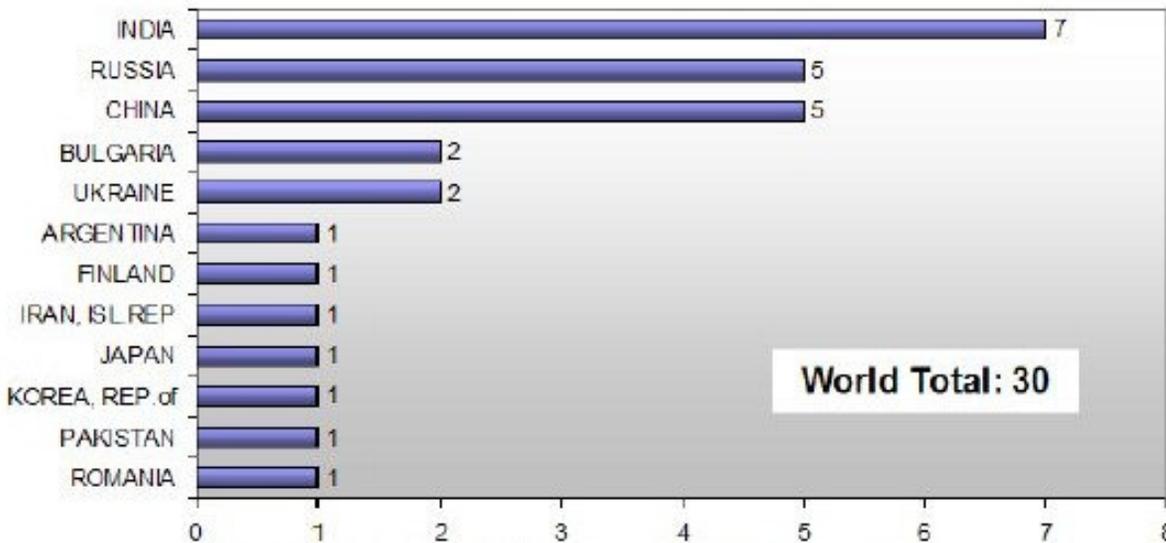
- Risque d'épuisement des réserves d'uranium naturel (en 40-80 ans).
- Impossibilité d'augmenter la part du nucléaire d'une façon importante (par ex. de 5 fois ou 10 fois).
- Difficulté de démarrage et de modulation de la puissance d'érogation.
- Démantèlement long et coûteux (~15% du coût initial et 25 ans de travaux).

Dans le monde :
 435 réacteurs
 (442 en 2006)
 et 284 réacteurs de
 recherche en 55 pays.

Number of Operating Reactors by Age
 (as of 3 of January 2007)



Number of Reactors under Construction Worldwide
 (as of 12 of February 2007)



Note: There were also 2 reactors under construction in Taiwan, China.

REACTEURS DANS LE MONDE

Données cumulées relatives aux combustibles utilisés dans les réacteurs nucléaires			
	Puissance installée	Pourcentage d'électricité	
Pays	GW électriques	d'origine nucléaire	Tonnages usées
France	58.5	76.4	11 770
Belgique	5.5	55.8	1 400
Suède	10	51.1	3 240
Suisse	3	36.8	1 300
Espagne	7.1	35	1 775
Finlande	2.3	29.5	975
Allemagne	22.7	29.3	6 315
Japon	38.9	27.2	8 600
Grande Bretagne	11.7	25.8	7 000*
U.S.A.	98.8	22	28 600
Canada	15.8	19.1	20 000**
Pays-Bas	0.5	4.9	150
Total	274.8		91 125

Les 'déchets' nucléaires

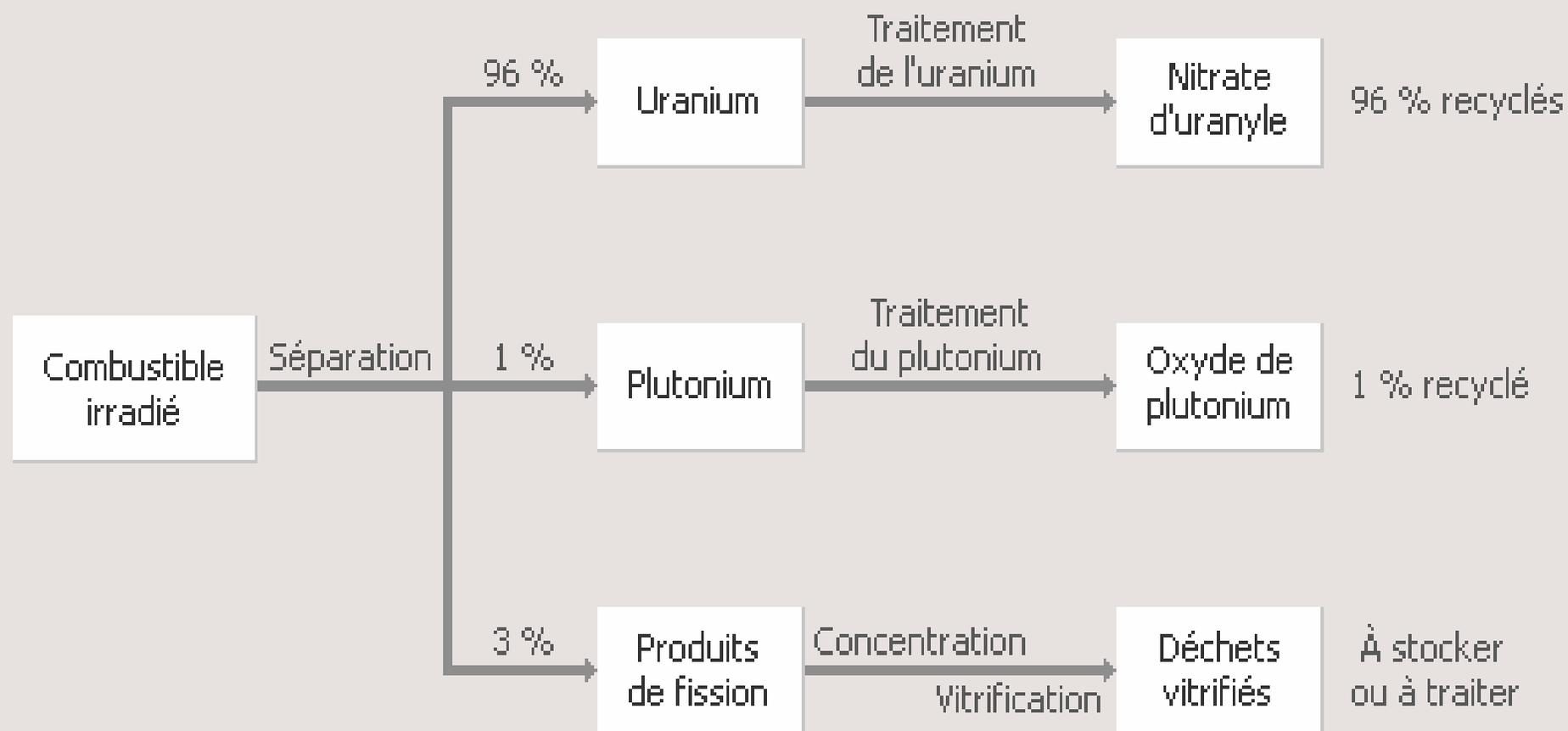
Après 1 an de fonctionnement, les 30 tonnes d'Uranium "appauvri" sont des "déchets", et contiennent :

- 95 % de U-238
- 1 % de U-235
- 1 % de Pu-239
- 3 % de fragments de fission

Les déchets : que faire en attendant ?

L'uranium enrichi après combustion contient encore 95 % d'uranium (essentiellement 238), environ 3 % de produits de fission (noyaux de masse 115 environ issus de la fission des actinides), et des noyaux plus lourds, plutonium en tête, lequel domine la radiotoxicité à long terme.

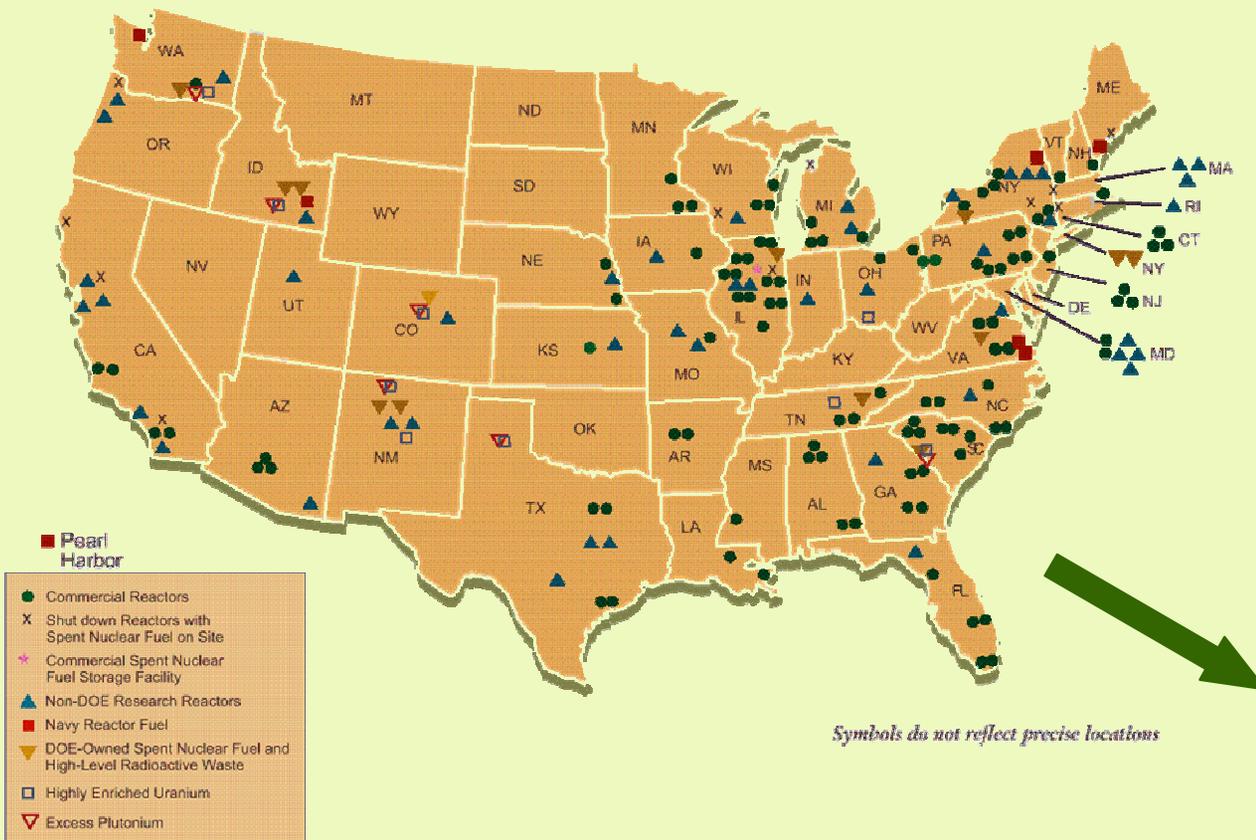
Comme on l'a vu, le plutonium est une matière fissile précieuse indispensable pour amorcer le déploiement de réacteurs régénérateurs durables. Il est par contre le déchet le plus important dans le cas d'un arrêt à court terme du nucléaire.





Sygma/A. Noguea

Locations of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste Destined for Geologic Disposal



Symbols do not reflect precise locations



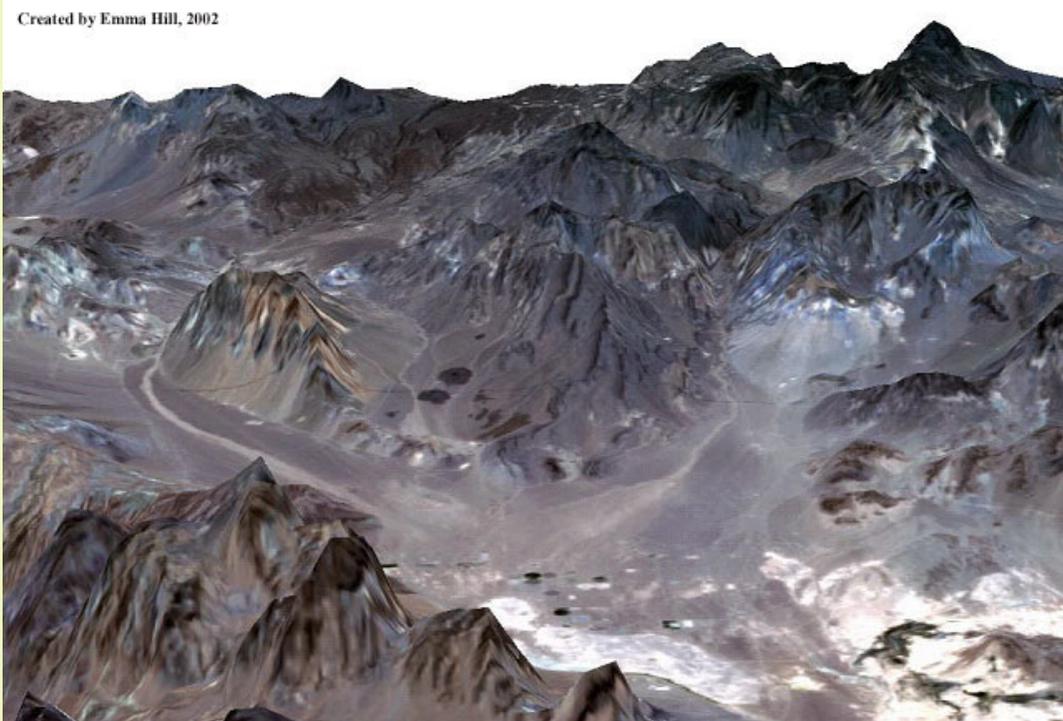
Coût : 50-100 G\$

Capacité : 77.000 tonnes

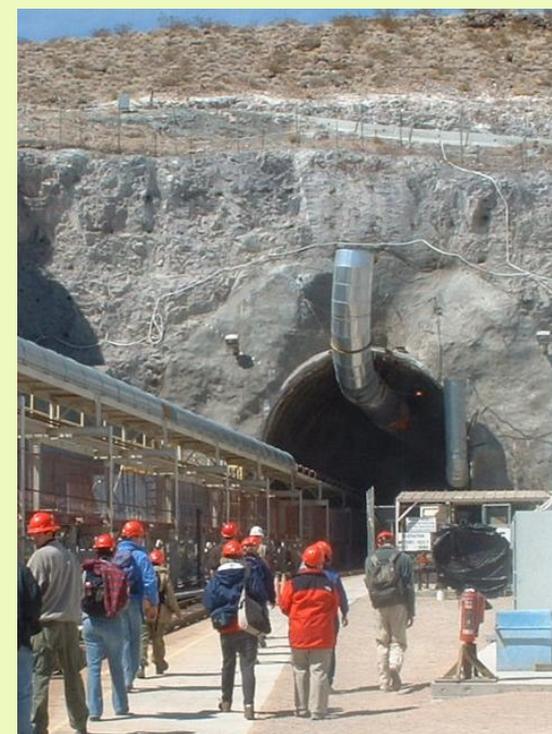
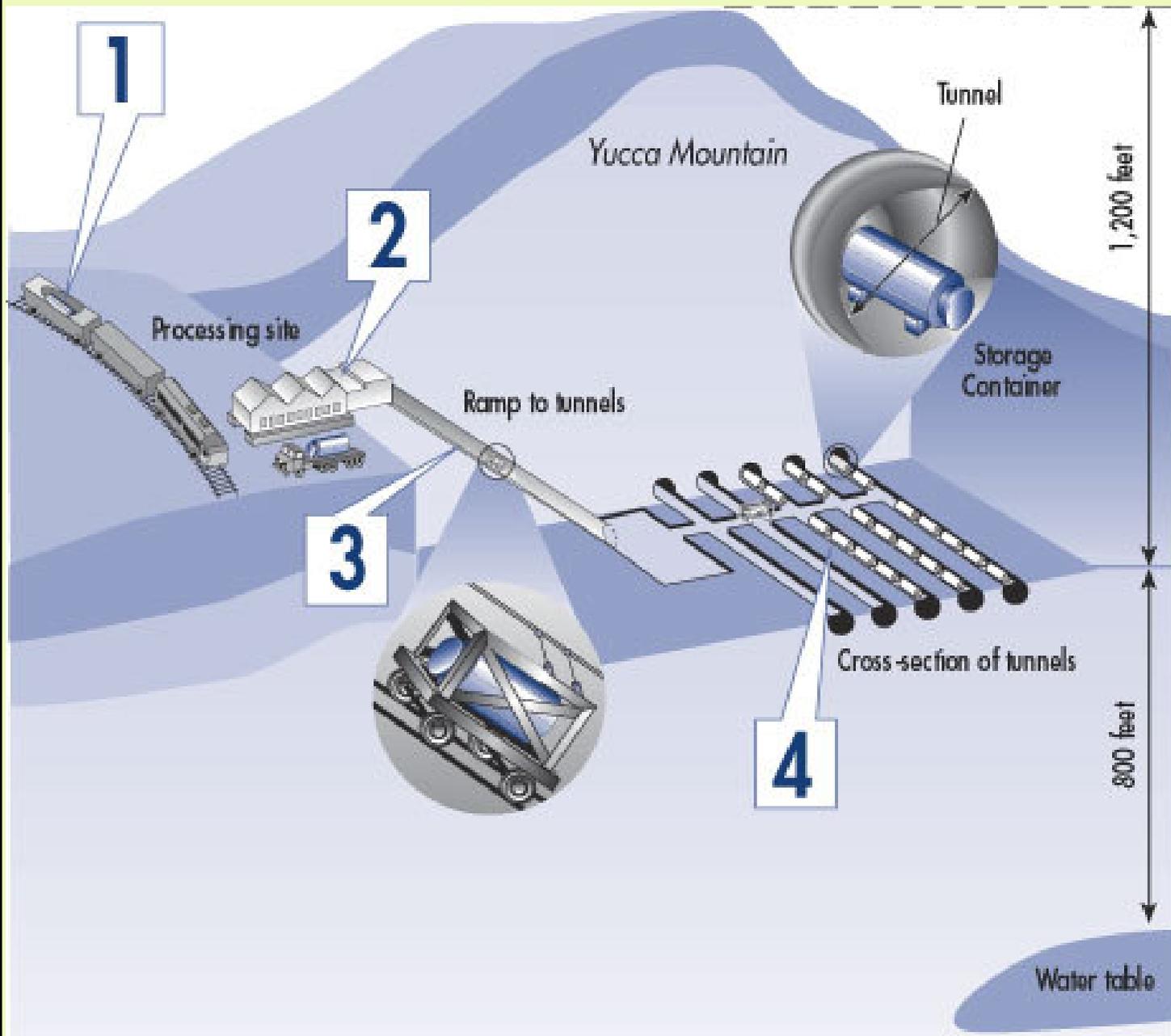
Temps de stockage :
10.000 ans



Created by Emma Hill, 2002



Yucca mountain



Les déchets nucléaires

La loi Bataille de 1991 aborde bien l'ensemble de la problématique déchets :

*axe 1: explore les possibilités de destruction partielle
(séparation - transmutation)*

*axe 2 : explore les possibilités de stockage définitif
(stockage géologique)*

*axe 3 : explore les possibilités de l'entreposage
(quelques siècles)*

Elle n'aborde pas la phase amont: *la séparation et le recyclage du plutonium, matière jugée réutilisable.*

Déchets nucléaires: conclusions provisoires (OPECST- projet de loi 2006)

Les 3 axes sont complémentaires:

*il faudra de toutes façons **entreposer** un certain temps les déchets avant de les stocker définitivement*

*le **stockage géologique** est techniquement possible dans un site ayant les caractéristiques de Bure*

*le stockage doit être **réversible** un certain temps, pour laisser un degré de liberté aux générations futures*

*la **transmutation** partielle des actinides mineurs peut faciliter leur stockage en réduisant les quantités et les charges thermiques des déchets, mais elle nécessite encore de nombreuses études*

Perspectives

- Les énergies renouvelables offrent un apport appréciable, mais qui ne dépassera pas 10% de la consommation d'énergie actuelle d'ici 2050.
- L'énergie nucléaire apparaît aujourd'hui comme le seul remplaçant possible au pétrole et au gaz naturel.
- Mais il faudra surmonter bien de barrières psychologiques, politiques, et même techniques...

Perspectives

- Une nouvelle génération de réacteurs (surgénérateurs) amènerait les réserves à plusieurs siècles, mais elle sera très longue à mettre au point (→ 2035).
- Quant à la fusion (ITER), elle sera exploitable dans ~80-100 ans (si ça marche).