
Quo Vadis Kernenergie?

Neue Reaktorgenerationen III und IV

Dan Gabriel Cacuci

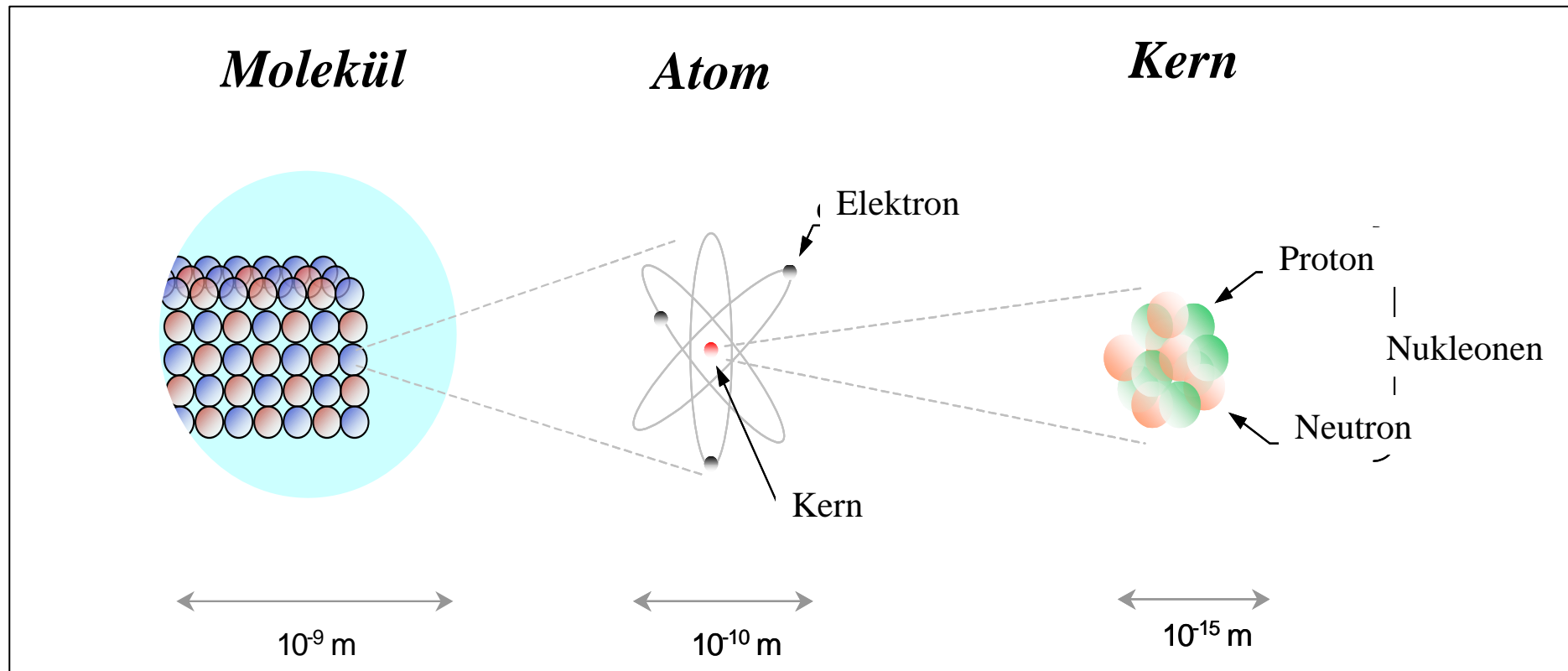
**Institutsleiter, IKR, Universität Karlsruhe
Wissenschaftlicher Direktor, CEA, Frankreich**

VORTRAGSINHALT:

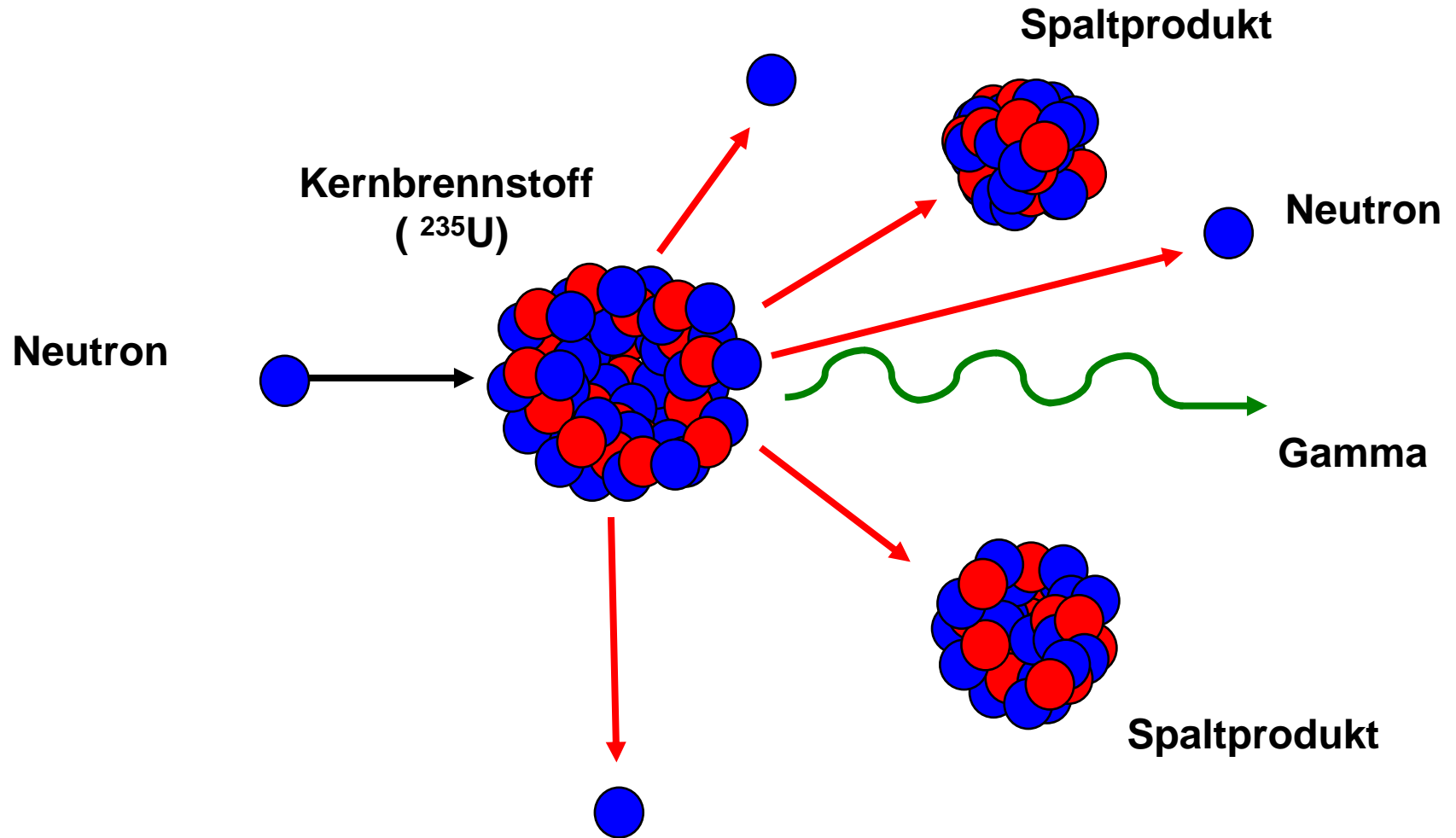
- **Einleitung: Kernkraftwerken und Brennstoffkreislauf derzeit**
- **Energielage weltweit: welche Rolle für Kernenergie?**
- **Reaktorgenerationen III und IV: Forschungs- und Entwicklungspläne Europa- und Weltweit**

-
- **Einleitung: Kernkraftwerken und Brennstoffkreislauf derzeit**
 - **Energielage weltweit: welche Rolle für Kernenergie?**
 - **Reaktorgenerationen III und IV: Forschungs- und Entwicklungspläne Europa- und Weltweit**

Moleküle, Atome, Kerne: Maßstäbe



Kernspaltung von U-235 durch thermische Neutronen



Verschiedene Energien im Vergleich :

- **Mechanische (oder Gravitations-) Energie:**

1 kWh ~ 3 t Wasser x 100 m Fall
~ 10000 m³ Luft x 100 km/h

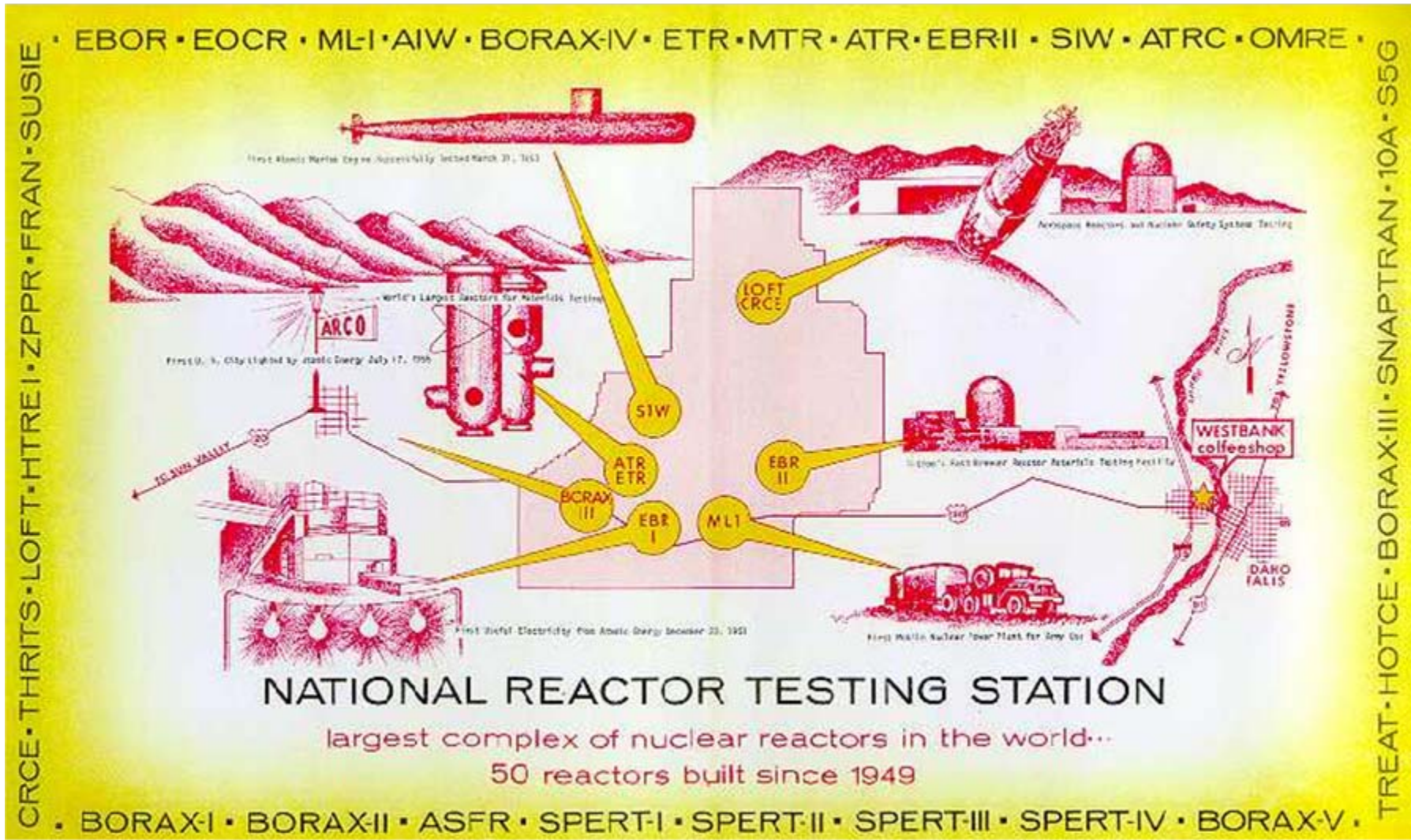
- **Thermische oder Chemische Energie:**

1 kWh ~ 0,1 kg de Öl, Kohle, Gas
~ 10 m² Solarzelle x 1 h

- **Kernspaltungsenergie:**

1 kWh ~ 0,022 g U-235 (1 g U-235 ~ 1 MWt)

The Nifty 50's and the Rebellious 60's...



(Zufahrtsweg zum Westbank Coffeshop in Idaho Falls, 1973)

Die dominante Spezies heutzutage : Leichtwasserreaktoren (LWR)

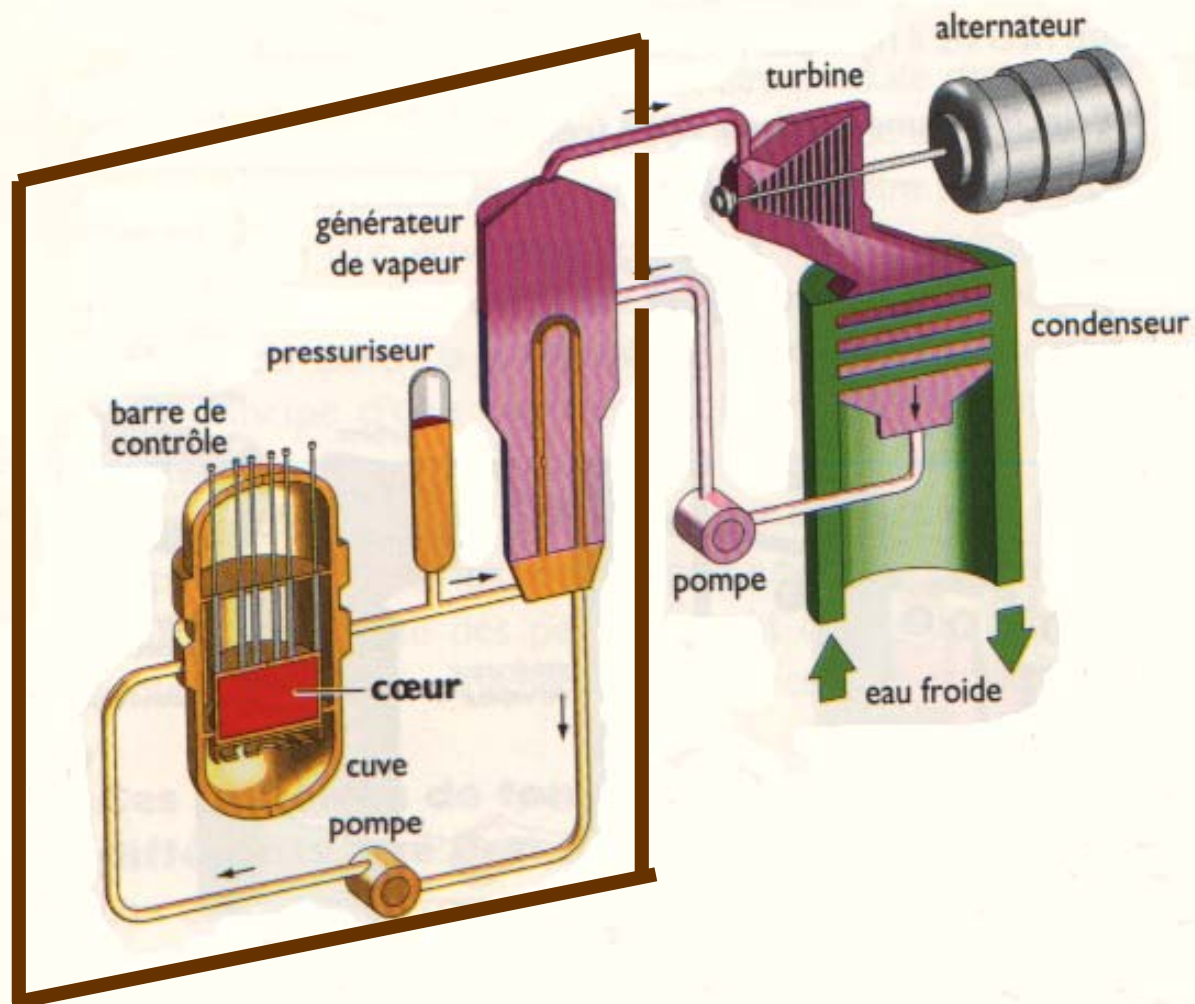


- ✓ über 400 LWR (80% des Weltparks)
- ✓ ca. 17% der Stromsproduktion
- ✓ 10 000 Reaktor- Jahre Erfahrung

Feststellung: Die Dominanz vom heutigen LWR (DWR und SWR) wird voraussichtlich bis (mindestens) 2030 bleiben...

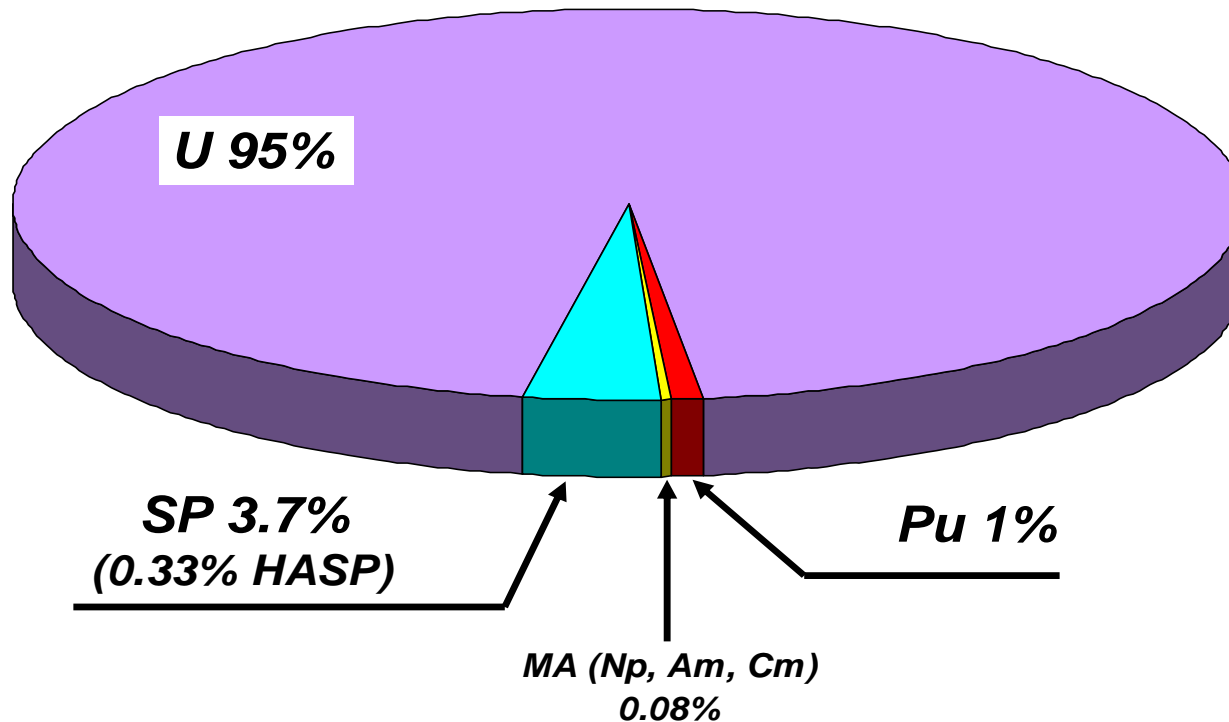
Schaltung eines DWRs (indirekter Kreislauf)

Enceinte



Abgebrannte DWR Brennelemente: Typische Eigenschaften

Relativgewichte:



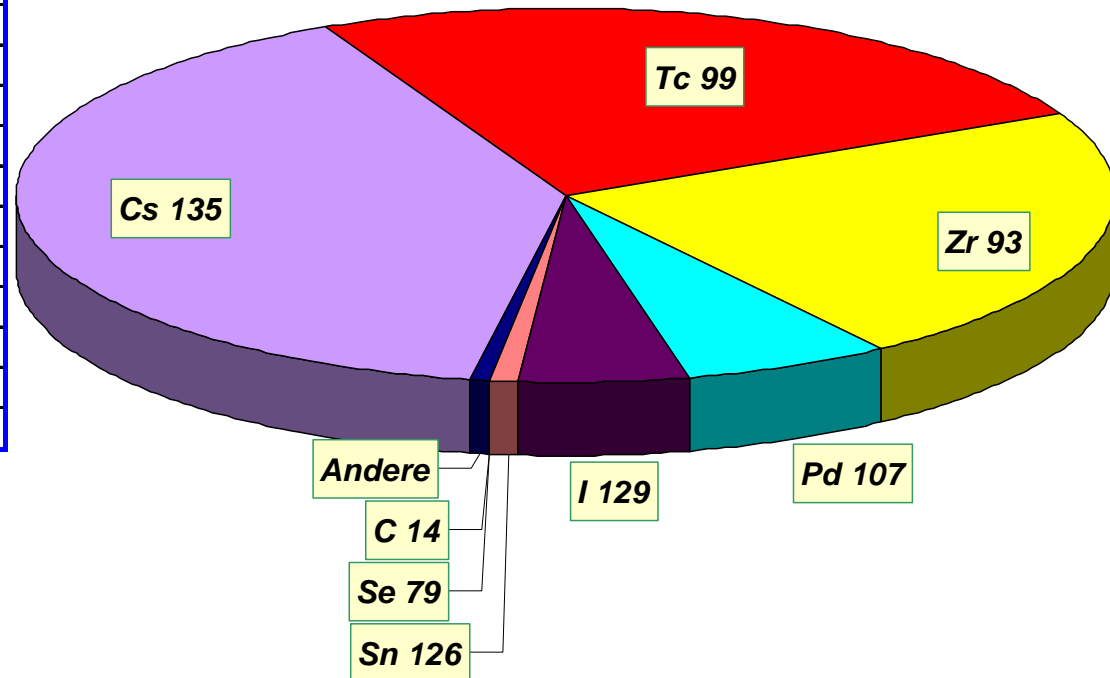
DWR 1300 MW, 3.5% U-235,
Abbrand 33 GWd/t, 3Jahre-abgekühlte abgebrannte Brennelemente

Hochaktive Langlebige Spaltprodukte

0.33 % des
abg. Brenn's

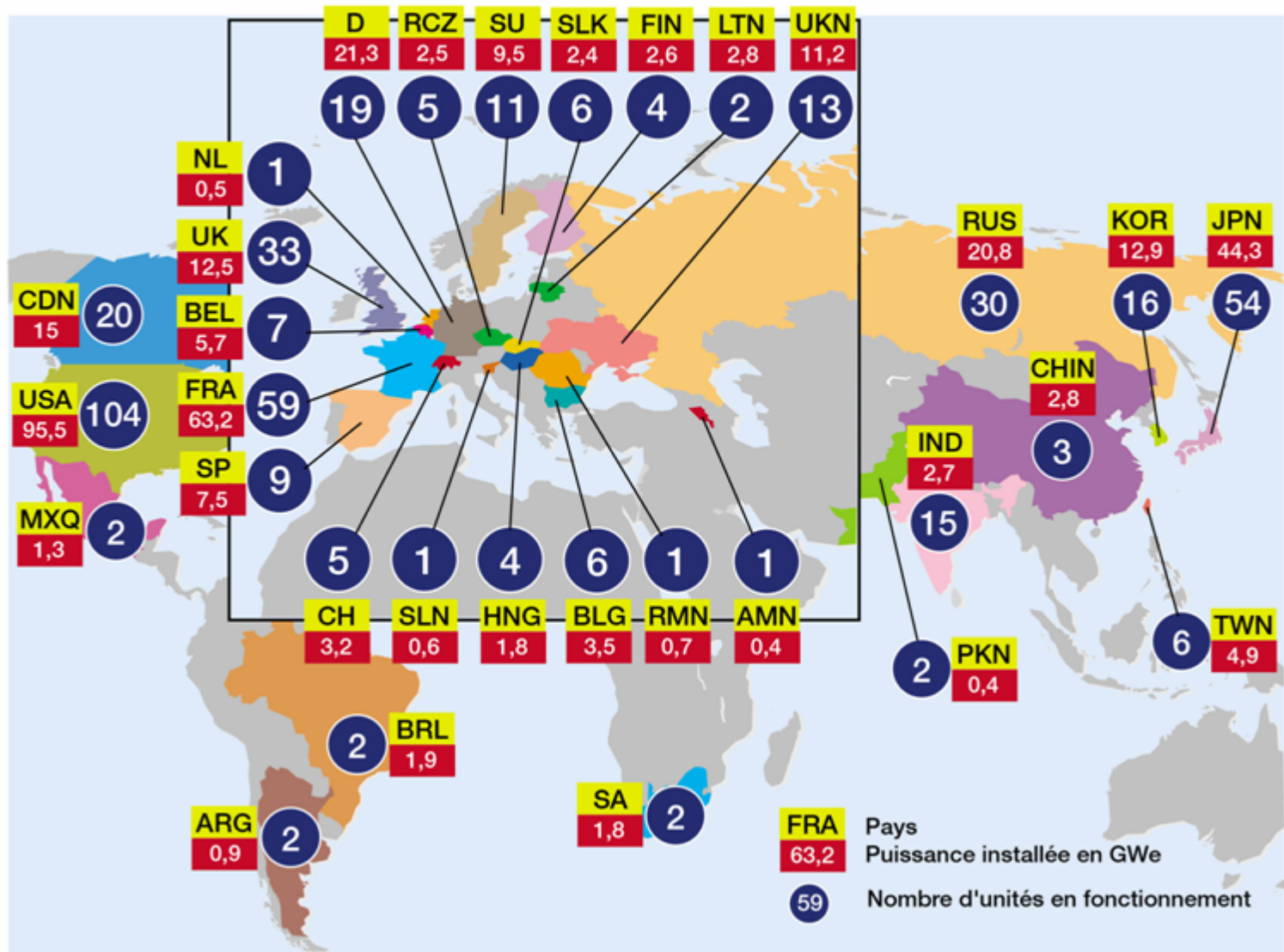
	Halbwertszeit	Gewicht	
	(Jahre)	(kg/Jahr)	
		113,30	
Cs 135	2,3E+06	45,36	40,04%
Tc 99	2,1E+05	28,14	24,84%
Zr 93	1,5E+06	25,62	22,61%
Pd 107	6,5E+06	6,91	6,10%
I 129	1,6E+07	5,84	5,15%
Sn 126	1,0E+05	0,70	0,62%
Se 79	1,1E+06	0,16	0,14%
C 14	5,7E+03	0,004	0,00%
Andere		0,56	0,50%
		113,30	100,00%

Langlebige Spaltprodukte



DWR 1300 MW, 3.5% U-235, Abbrand 33 GWd/t, 3Jahre-abgekühlte
abgebrannte Brennelemente

444 CENTRALES NUCLEAIRES EN FONCTIONNEMENT DANS LE MONDE

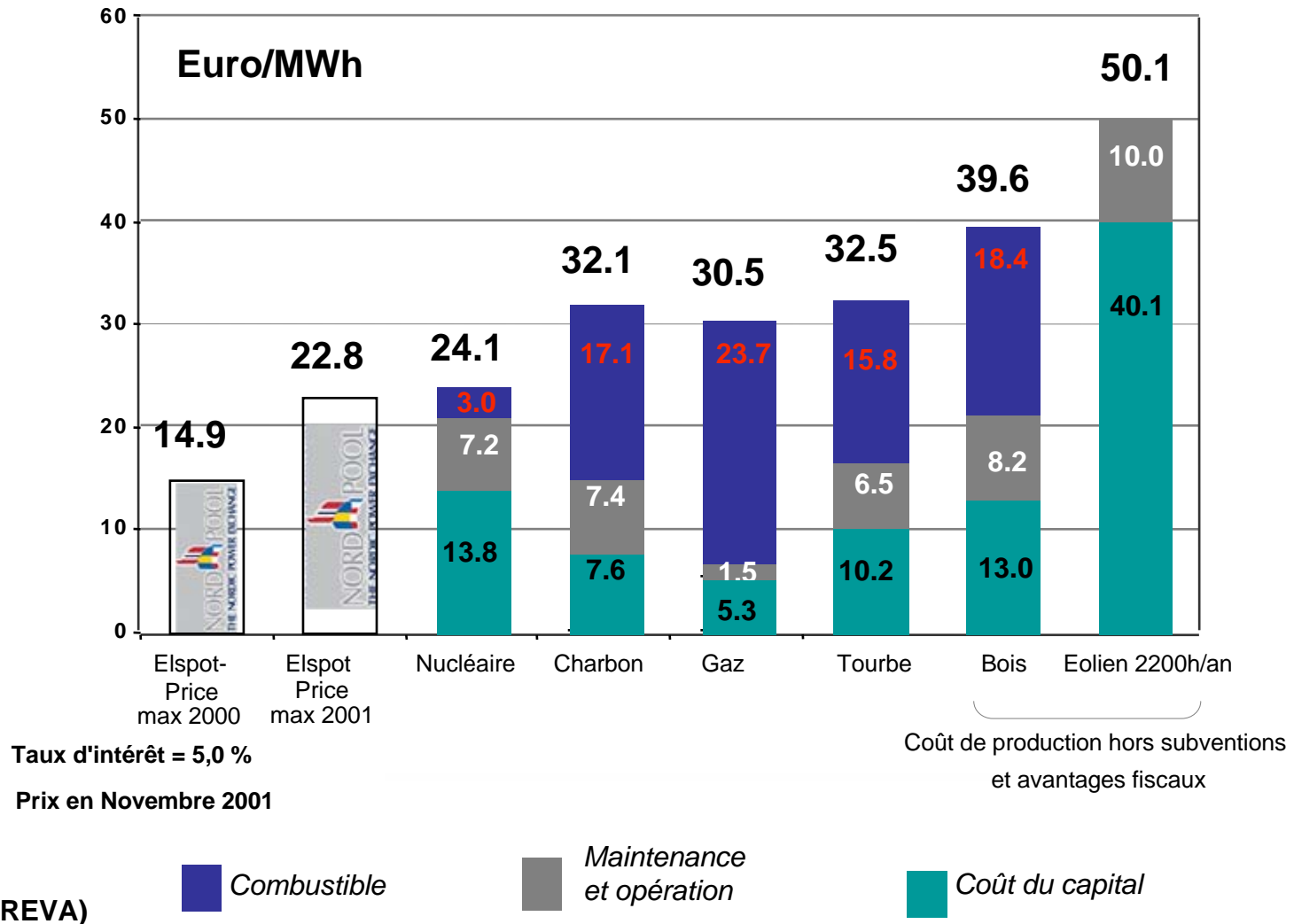


Source : Framatome (AT-A4)



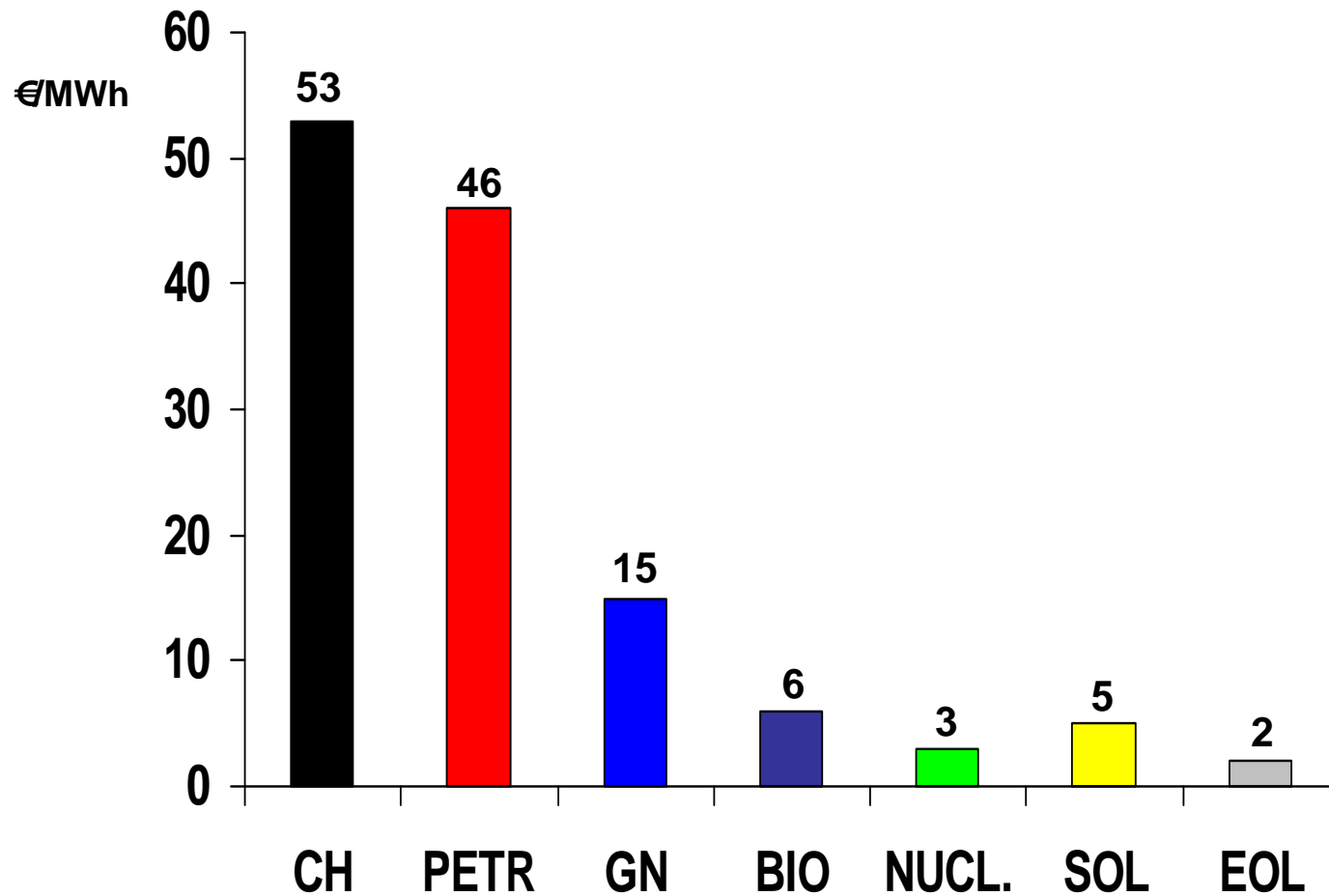
Stromerzeugungskosten (€/MWh): Finnland-Studie, März 2002

Coût de production de l'électricité





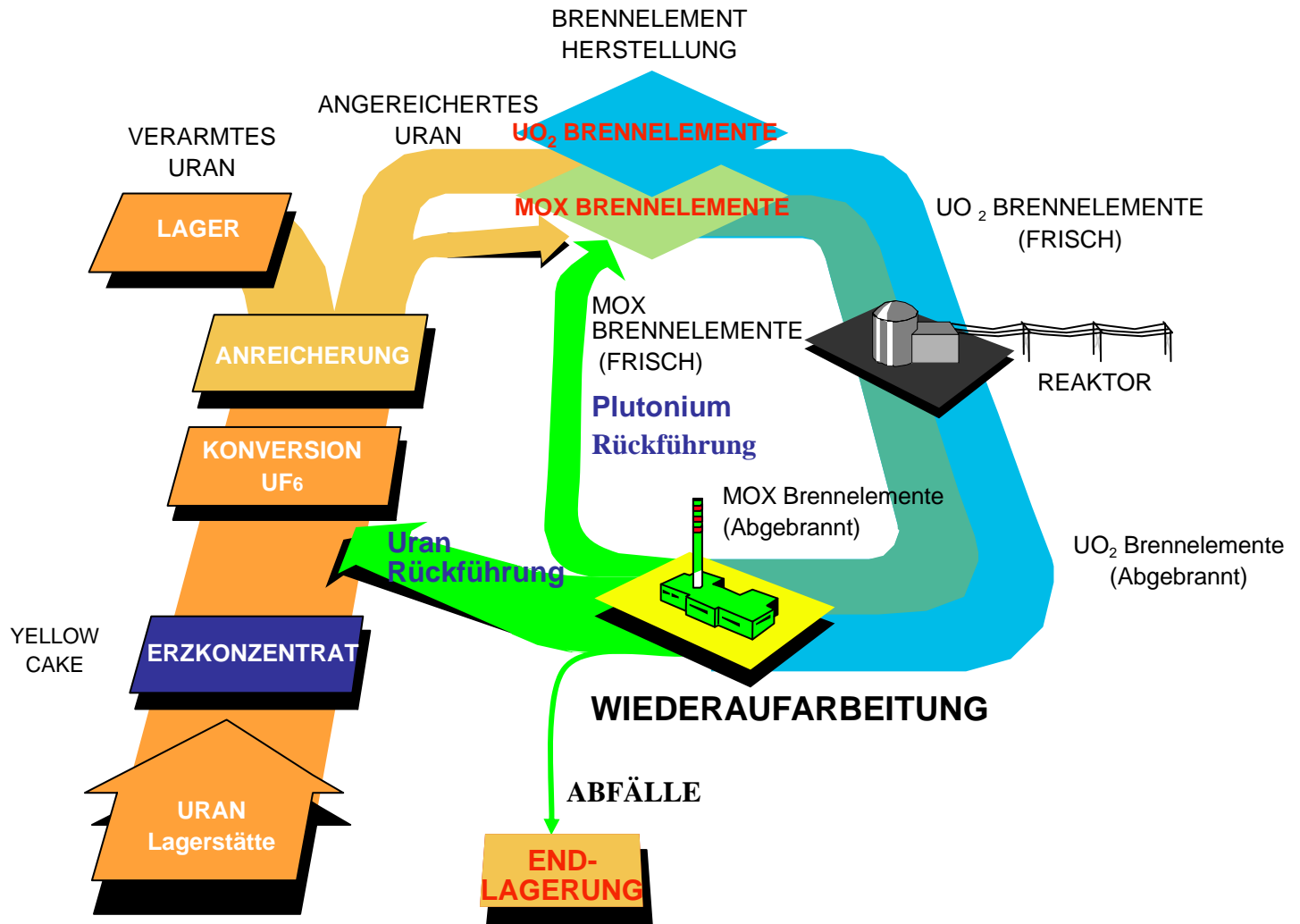
„Externe Kosten“ (Umweltverschmutzung, Gesundheit, etc)



1999

Quelle: ExternE, J. Weisse, März 1999

Der Kernbrennstoffkreislauf (LWR)



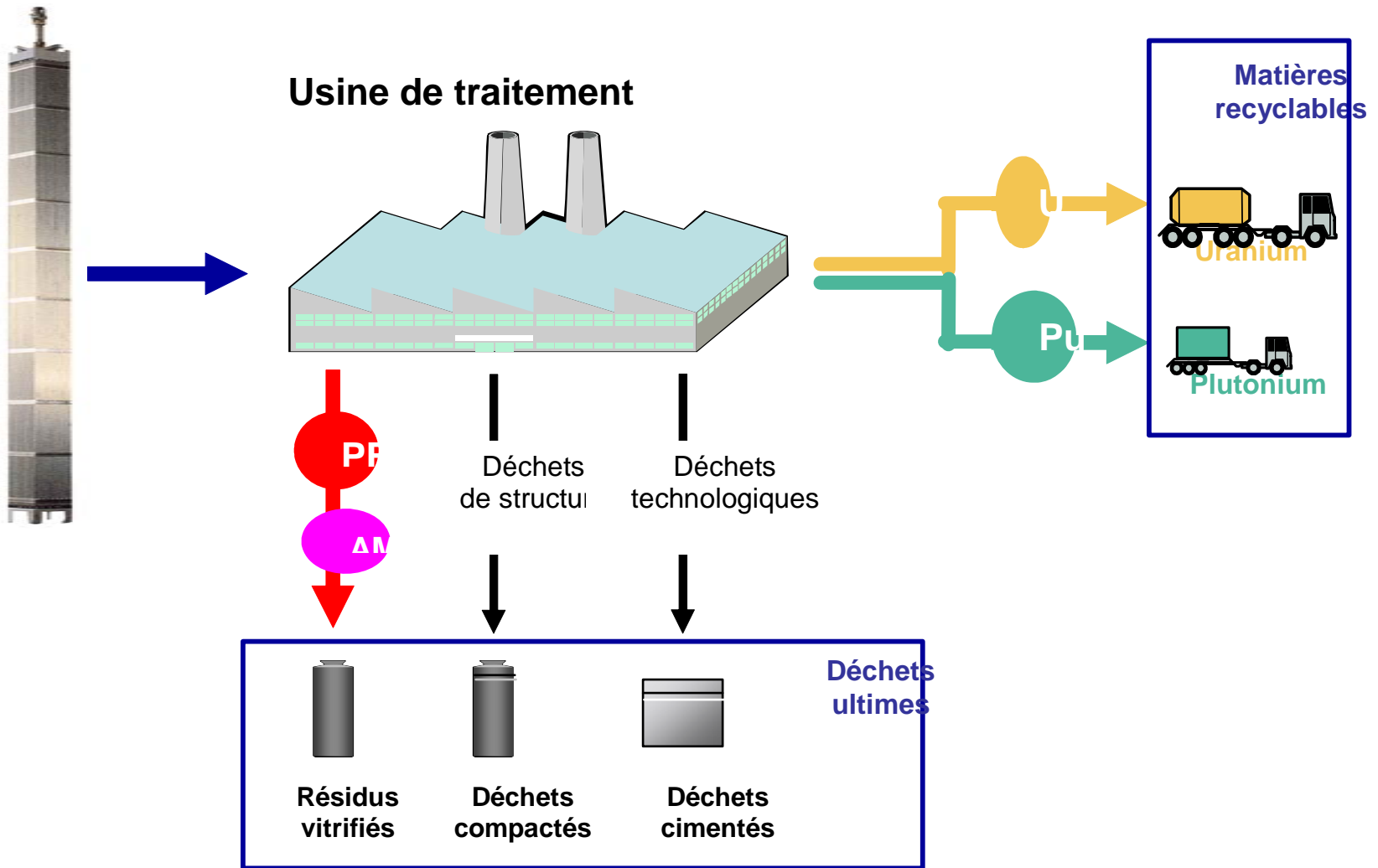


Anreicherung von Uran

- Uran = 0.7% U-235 (starker Brennstoff) + 99.3% U-238 (schwacher Brennstoff)
- LWR benötigen angereichertes (2,5% bis 4,9% U-235) Brennstoff
- Anreicherung Technologien: Gas-Ultrazentrifugieren oder Gasdiffusion



Kernbrennstoffkreislauf (LWR): Wiederaufarbeitung





Wiederaufarbeitungsanlage AREVA (COGEMA) -La HAGUE

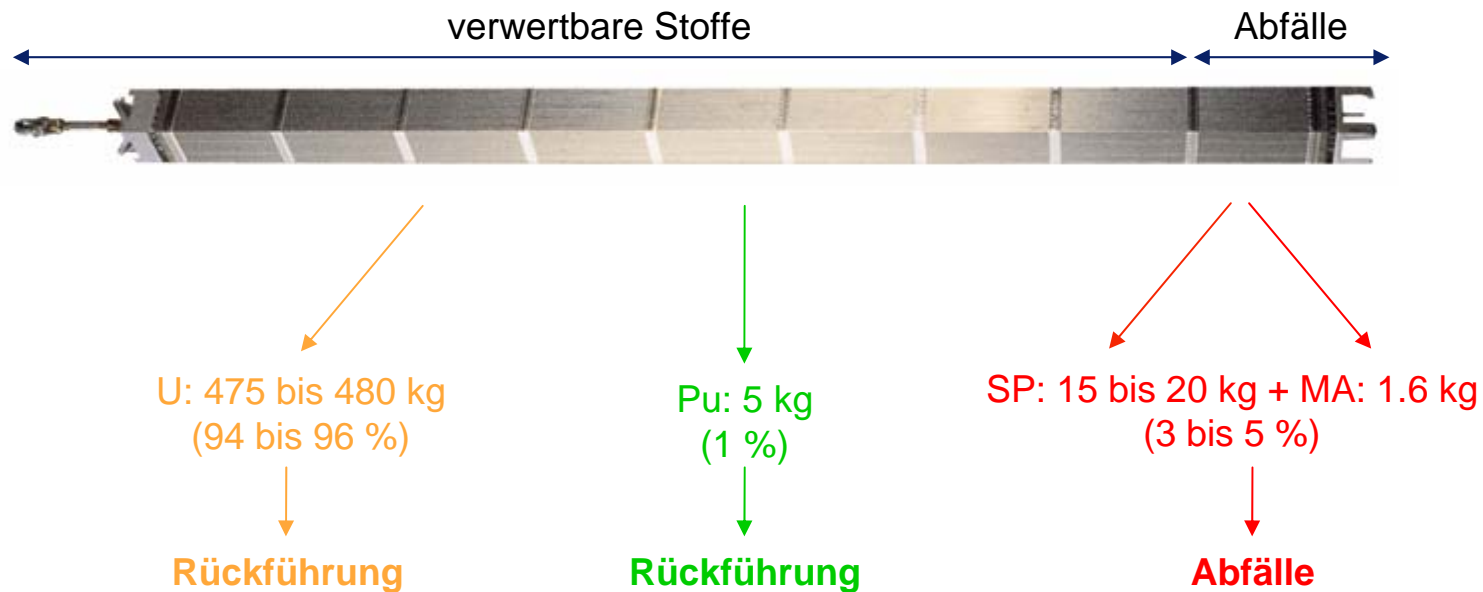




Zielsetzung der Wiederaufarbeitung: Spaltstoffrückführung

- Ein frisches Brennelement (LWR) enthält ca. 500 kg Uran

Nach Bestrahlung*:



* Prozente von Abbrand abhängig

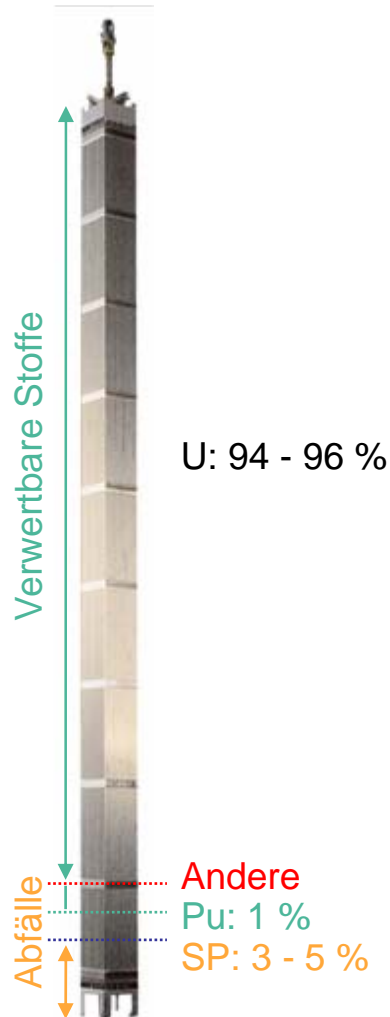
Périodes de quelques radioéléments

Carbone 14	5700 ans	Potassium 40	1.3×10^9 ans
Radon 222	3,8 j	Iode 131	8 j
Césium 137	30 ans	Tritium	12 ans
Plutonium 239	24000 ans	Uranium 235	7×10^6 ans
Uranium 238	$4,5 \times 10^9$ ans	Thorium 232	14×10^9 ans

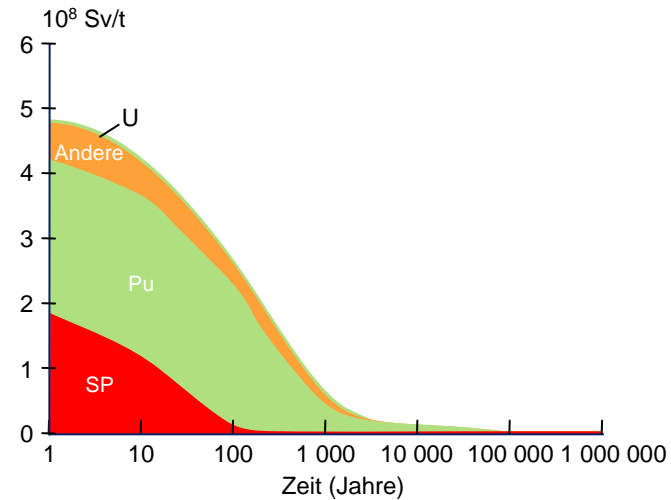
Nota : plus la période est longue, moins la radioactivité est importante.

Radiotoxizität des abgebrannten Kernbrennstoffs

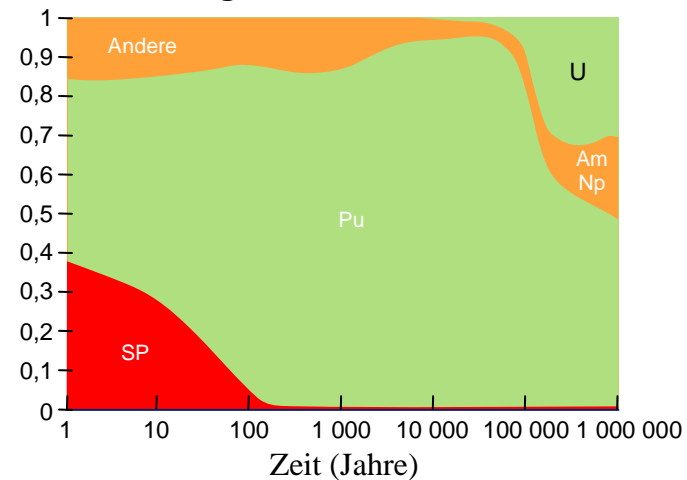
Abgebranntes
Brennstoffelement



Radiotoxizität



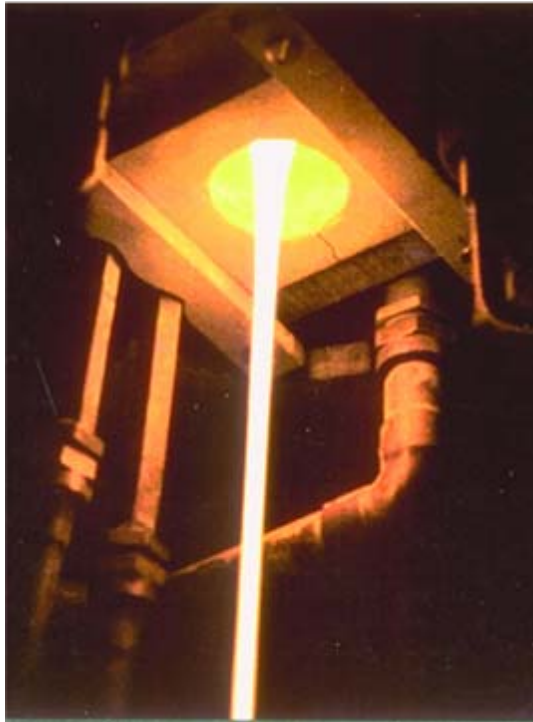
Beiträge zur Radiotoxizität



Verglasung von Hochradioaktiven Abfällen

1 % Volumen

> 90 % der Radiotoxizität



Glassguss

**10240 „Pakets“
hergestellt in
La Hague:
(10/2004)**



**Verglastes HR-Abfall-
Paket**

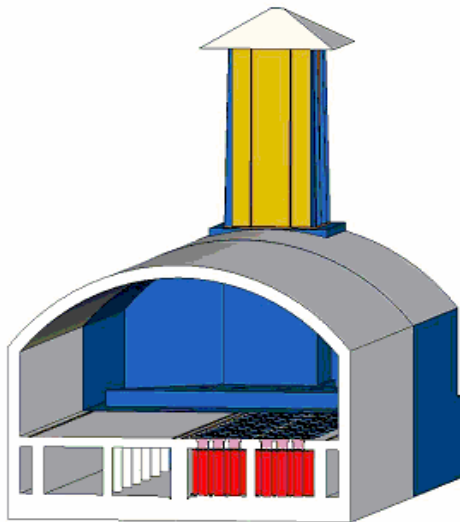
La Hague: Zwischenlager für HR-Pakets



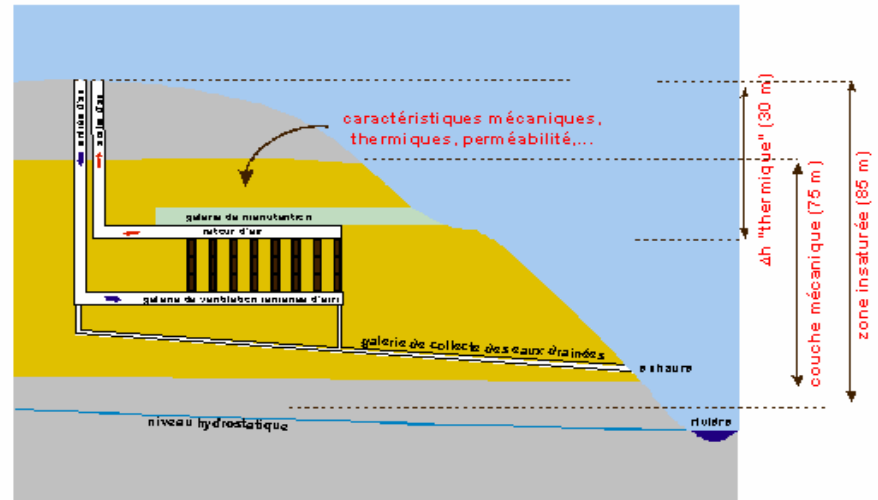


Entreposage de longue durée

Concepts d'entrepôt



Entreposage en surface

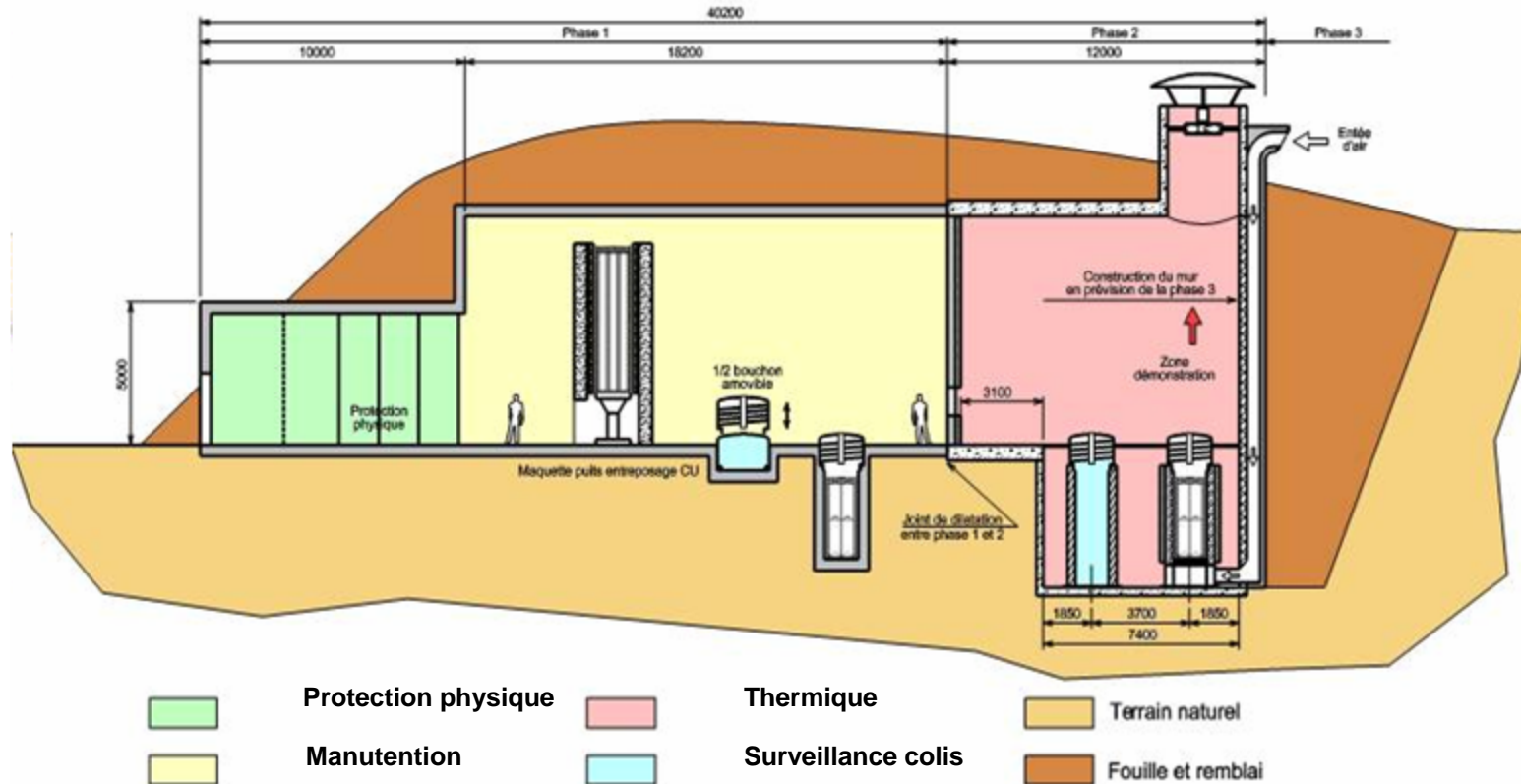


Entreposage en subsurface à flanc de colline



CECER

Galerie de démonstration Entreposage de subsurface CECER



Le CECER



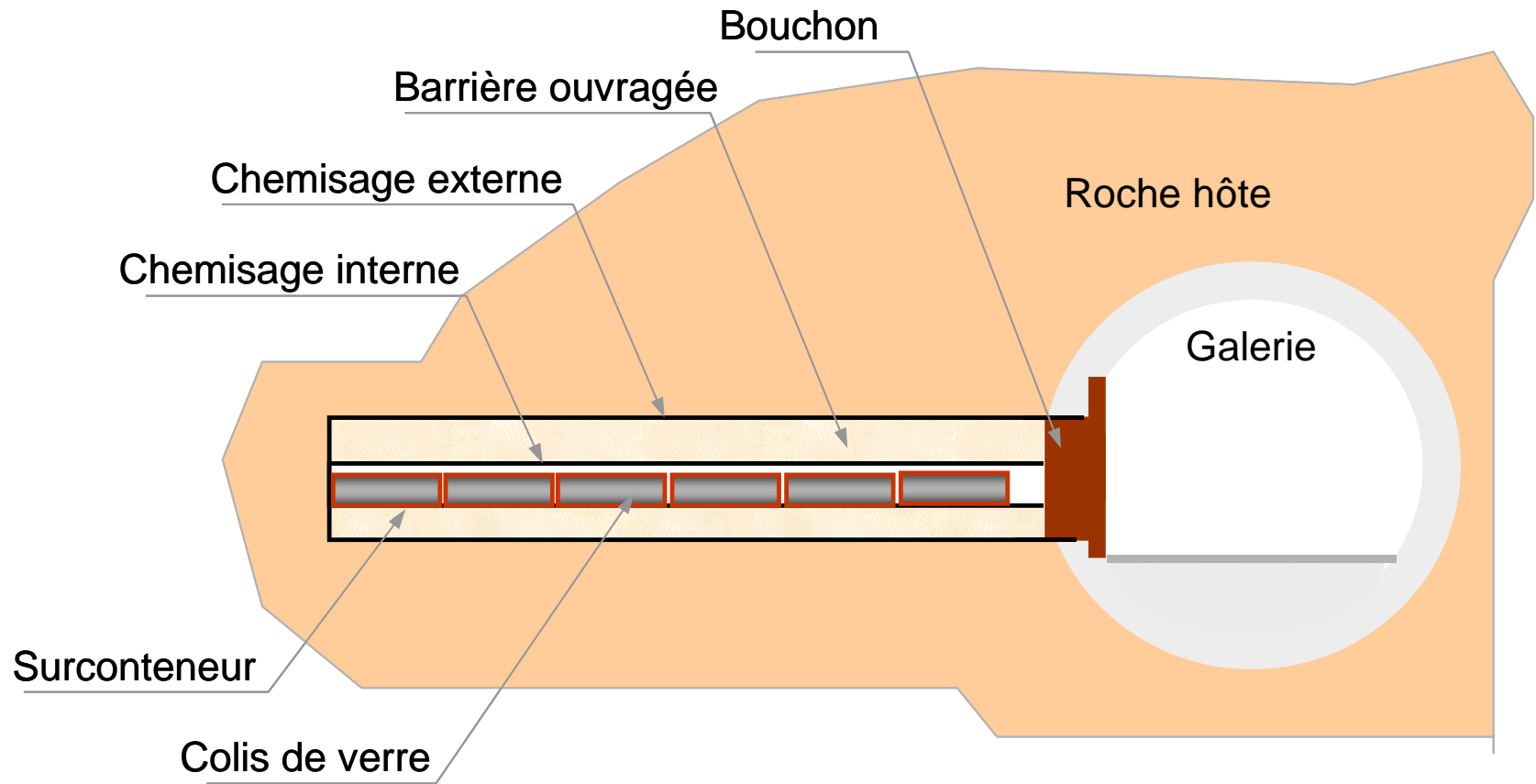


Stockage profond des déchets

- Ne pas laisser aux générations futures la charge de déchets dont nous sommes responsables.
- Principe : interposer entre le déchet et la biosphère plusieurs barrières (matrice de confinement, barrière ouvragée, barrière géologique) pour empêcher et retarder la migration des radionucléides pendant suffisamment longtemps pour que la décroissance radioactive fasse son œuvre. « Delay means decay! »
- Le défi : prédire l'évolution d'un stockage sur 100 000 ans. Aucune démonstration directe n'est possible. On peut seulement essayer de (se) convaincre par la modélisation et des expériences (partielles) de validation.

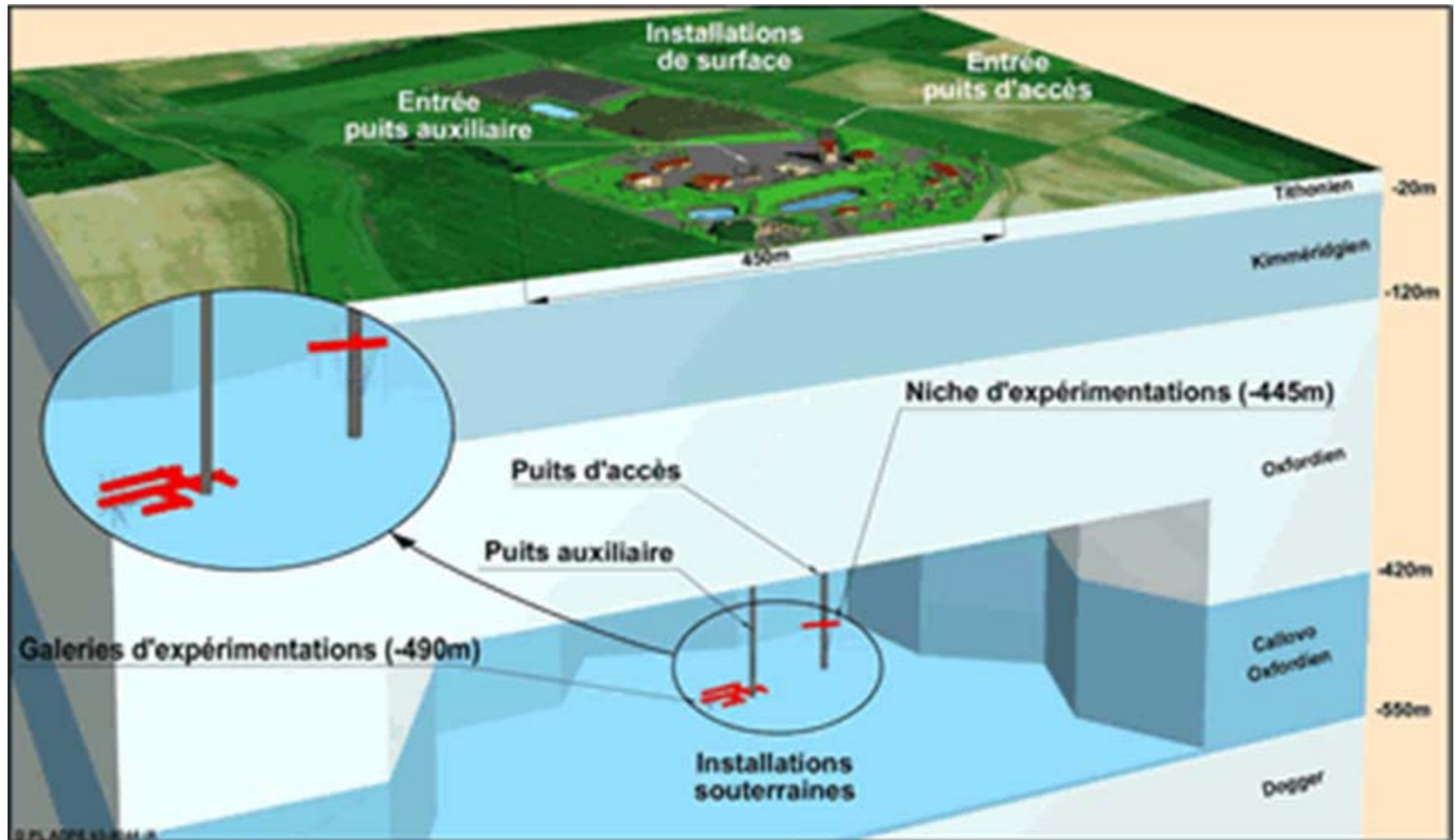


Concept de stockage





Le laboratoire souterrain de Bure



Le laboratoire souterrain de Bure



Abfälle in Frankreich: Größenordnungen...

Pro Einwohner und pro Jahr:

- **Haushalt-Abfälle:** **2200 kg**
- **Industrie-Abfälle:** **800 kg** (100 kg Hochtoxische)
- **Radioaktiven-Abfälle:** **1 kg** (10 g Hochradioaktive)

Activité : désintégrations par seconde

- becquerel **Bq** : 1 désintégration / seconde
- curie **Ci** : 37×10^9 Bq (37 GBq)

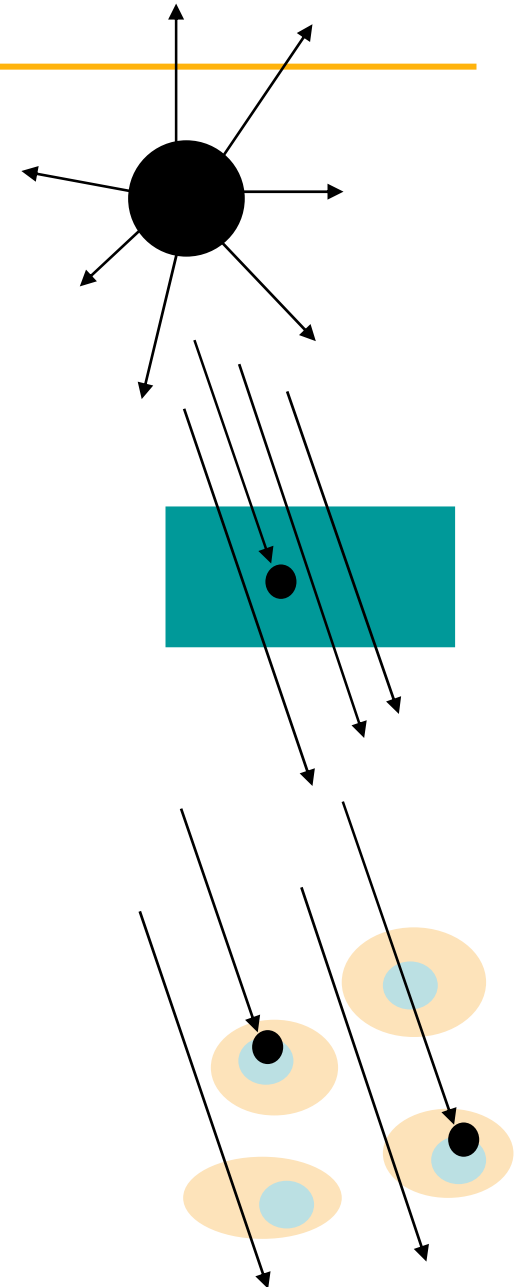
Dose : énergie absorbée / masse de matière

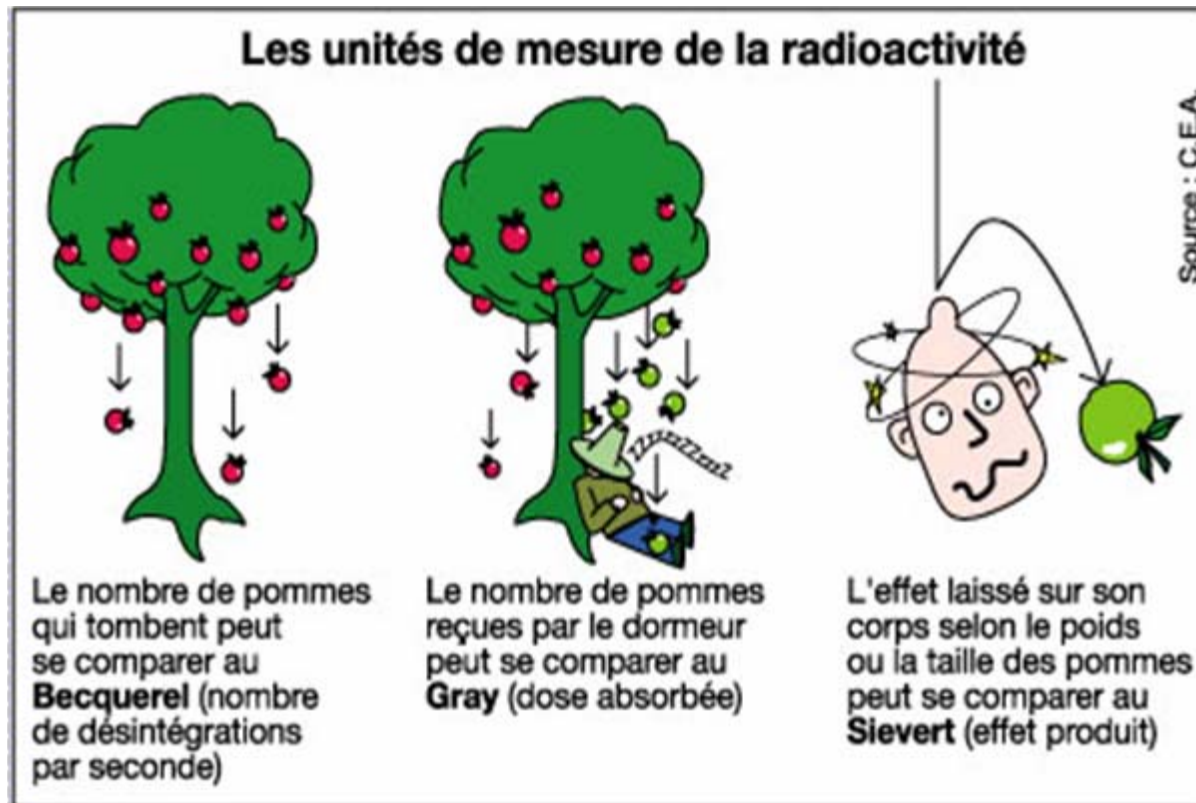
- gray **Gy** : 1 joule / kilogramme

Dose efficace : indicateur du risque global

unité additive utilisée pour la réglementation

- dose absorbée $\times W_R \times W_T$
- sievert **Sv**
- $W_R = 1$ pour RX, bêta et gamma
- $W_R > 1$ pour alpha et neutrons
- $W_T = 0.05$ pour la thyroïde





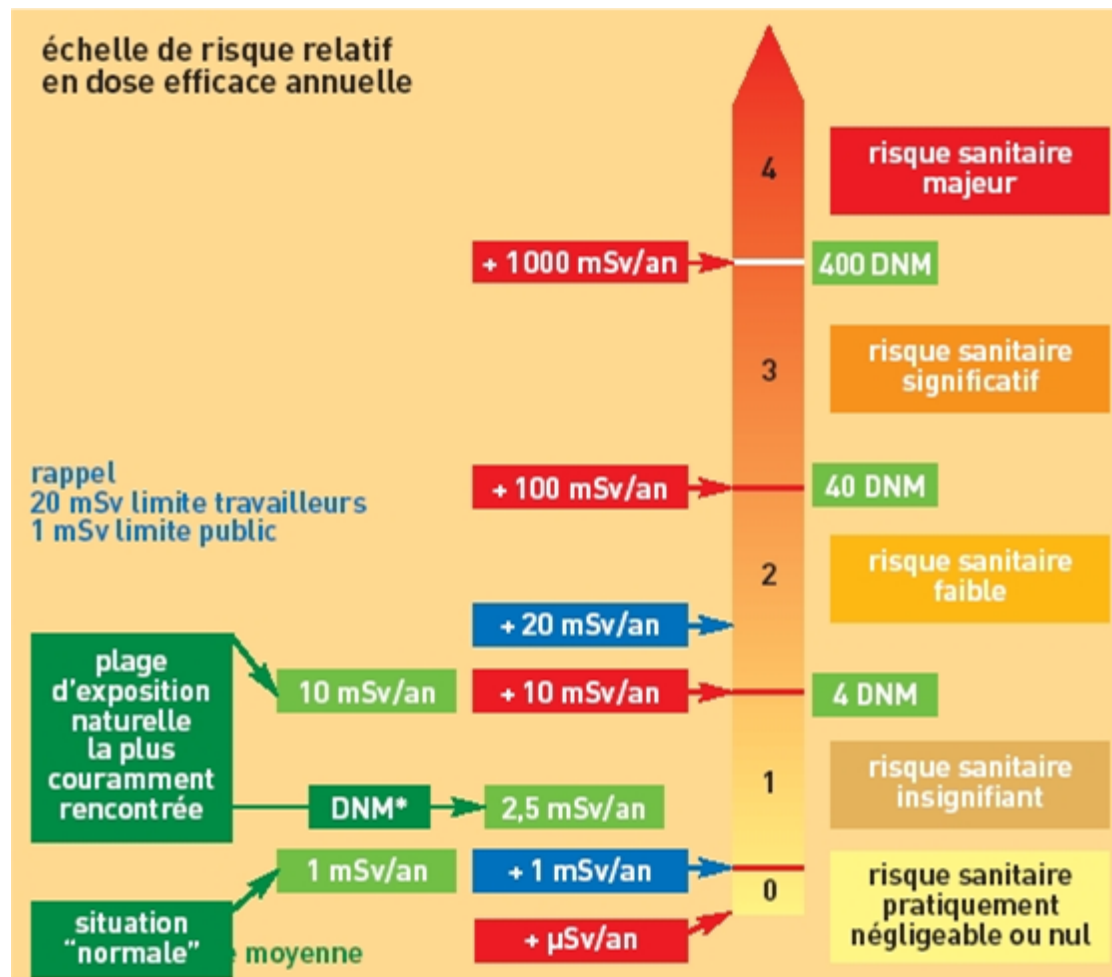
La dose absorbée se mesure en
Grays

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule par Kg}$$

L'effet sanitaire se mesure en Sievert

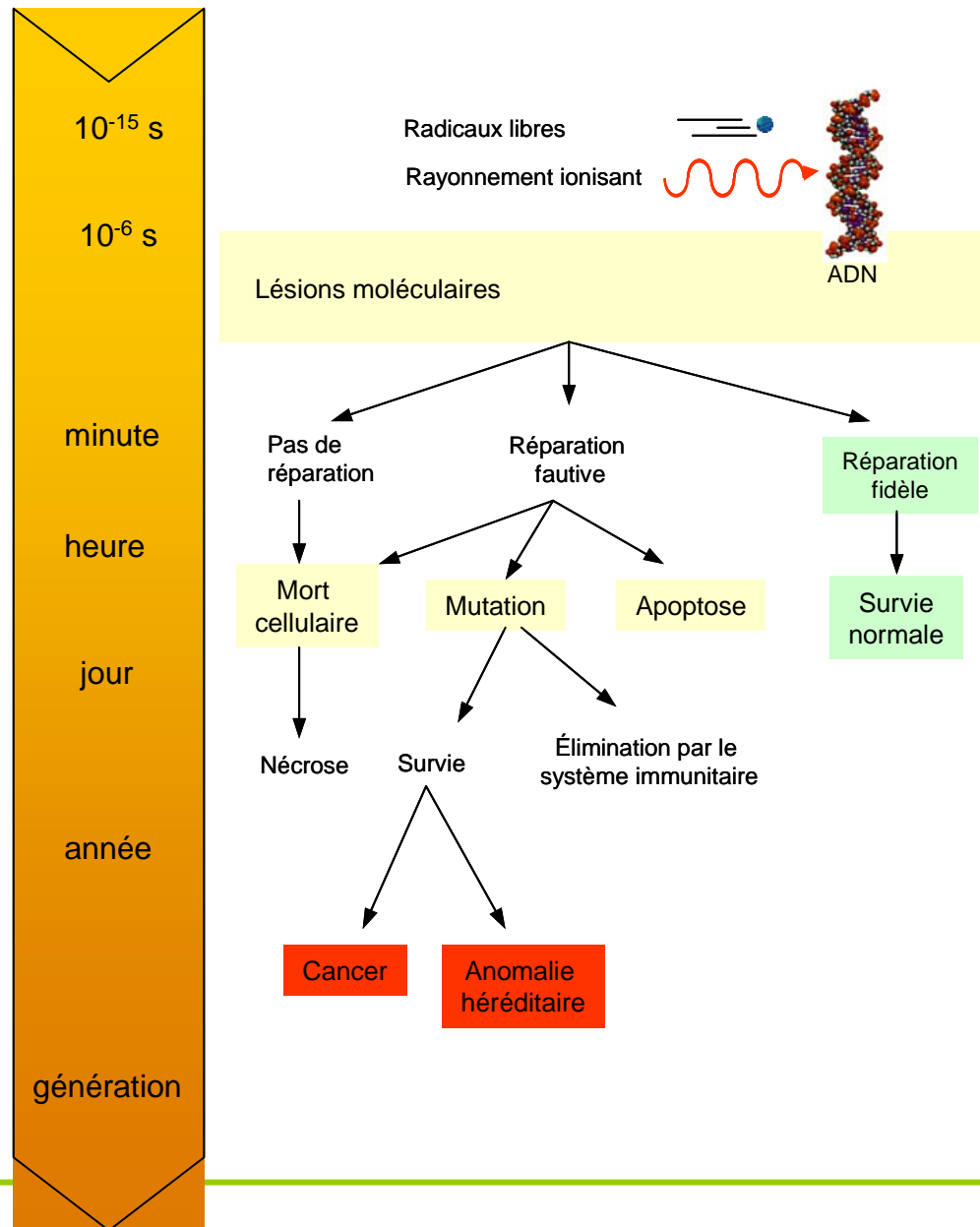
$$1 \text{ Sv} = W_R \times W_T \times 1 \text{ Gy}$$

L'échelle des doses radioactives





Effet des rayonnements sur le vivant





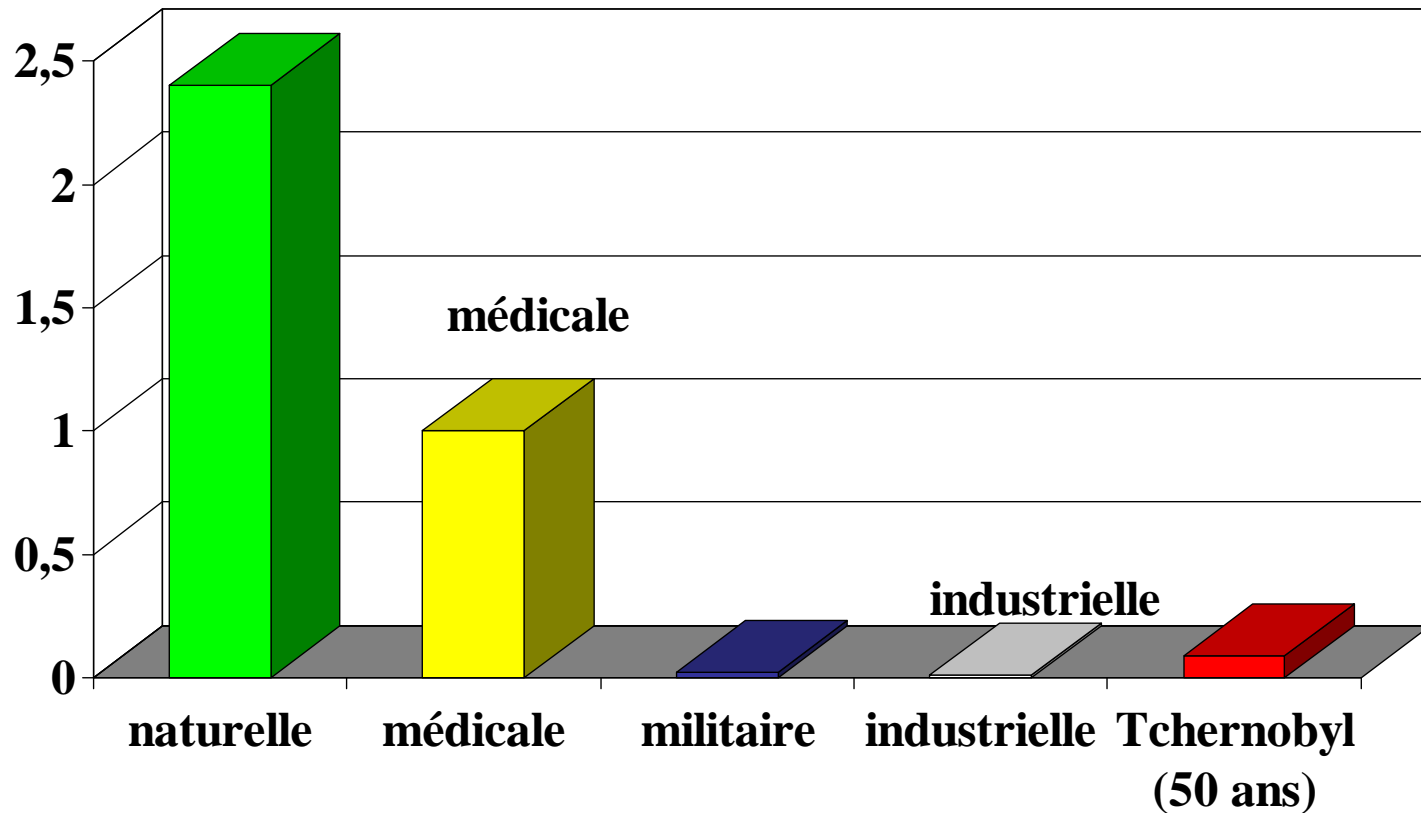
Jährliche Dosis in Frankreich: Größenordnungen

- natürliche Strahlenexposition: 2,4 mSv per Person
- medizinische Strahlenexposition: 1,6 mSv per Person
- 1,5 Liter/Tag Mineralwasser, Erwachsene(r); 0,03 mSv
- Auswirkungen COGEMA-La Hague 2000*: **<0,02 mSv**
- Flug Paris / New-York: **0,02 mSv**
- 400 m Höhenwechsel: **0,02 mSv**
- 200 g Miesmuschel: **0,02 mSv**

- Tschernobyl (50 Jahre, OECD): **0,088 mSv**

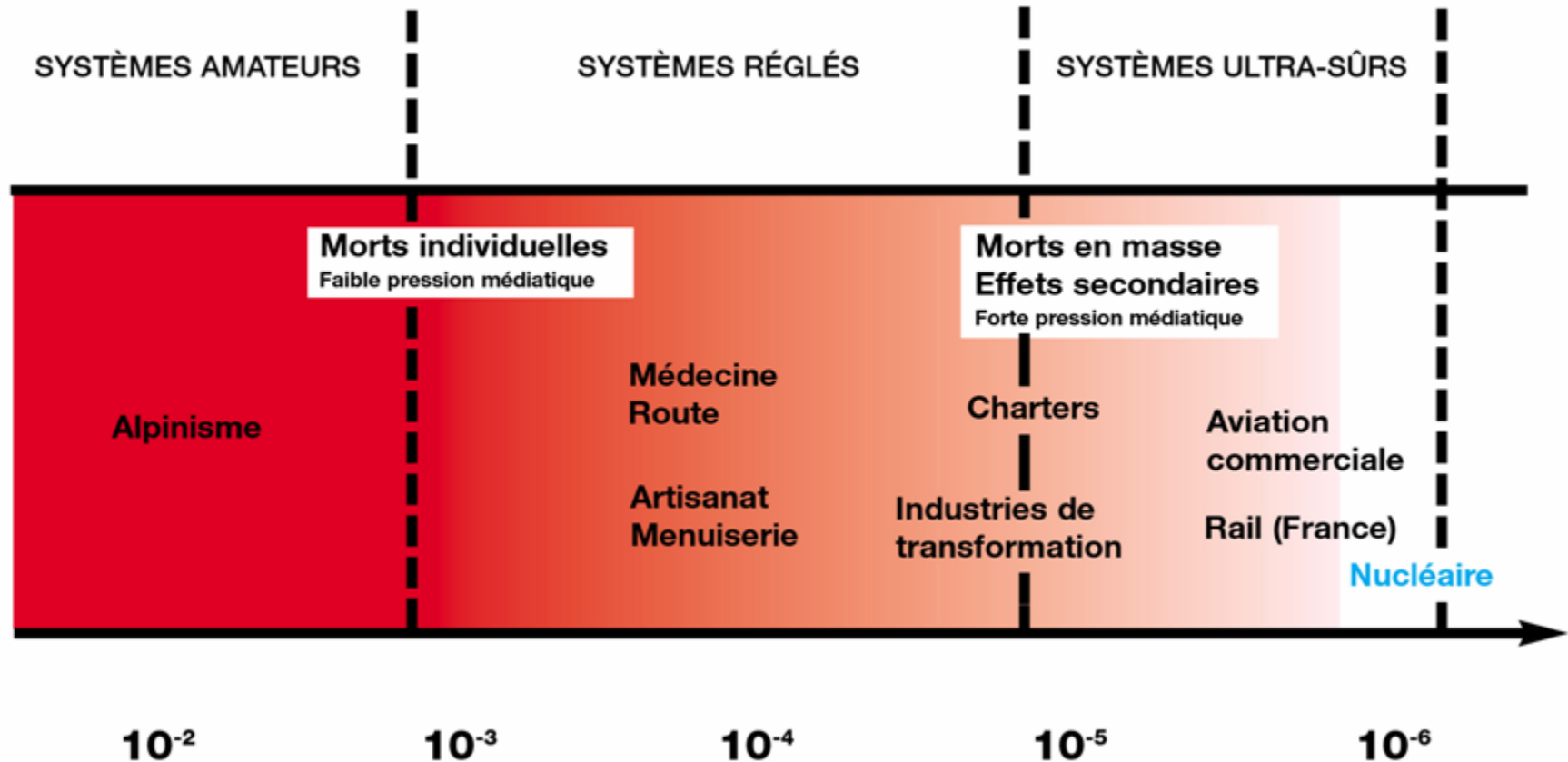
* Vergleichsgruppe

Ordre de grandeur des doses (énergétiques) annuelles de notre environnement



RISQUE EN FONCTION DE L'ACTIVITÉ

Moins les accidents sont fréquents, plus on en parle !



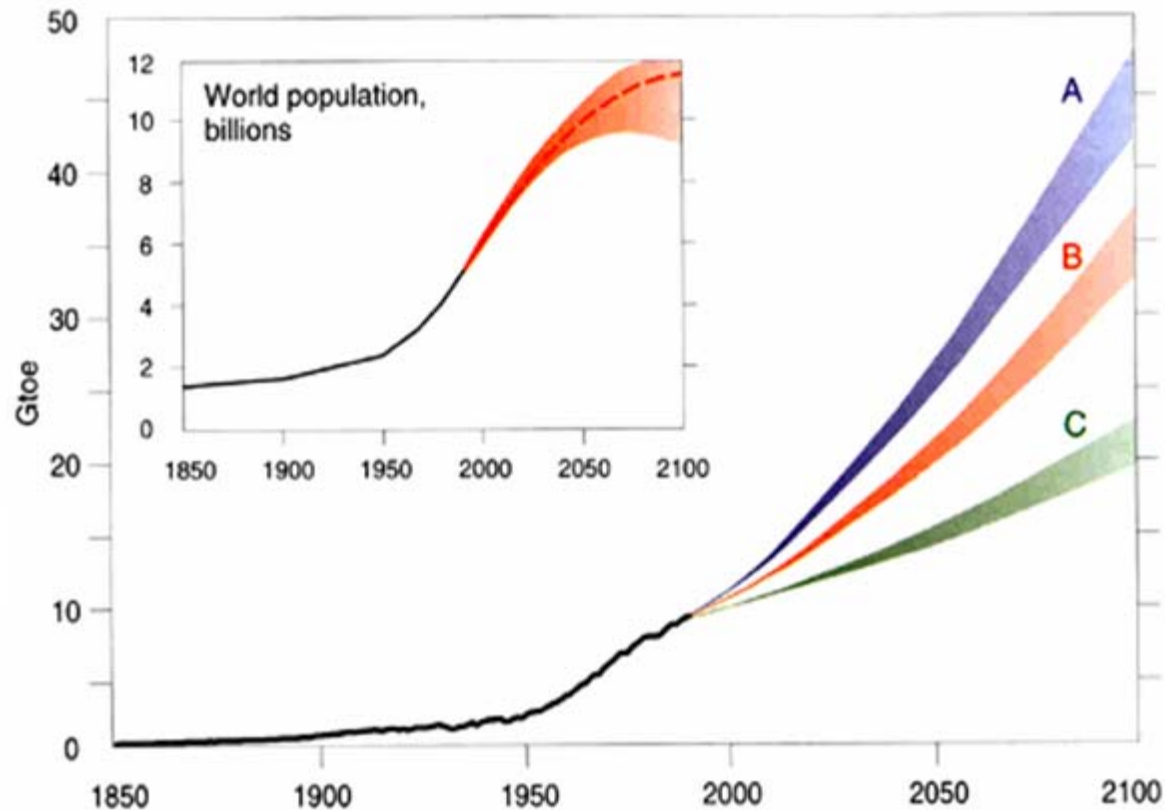
10^{-4} : 1 catastrophe pour 10 000 mises en œuvre

Quelle: AREVA-NP, 2002

-
- **Einleitung: Kernkraftwerken und Brennstoffkreislauf derzeit**
 - **Energielage weltweit: welche Rolle für Kernenergie?**
 - **Reaktorgenerationen III und IV: Forschungs- und Entwicklungspläne Europa- und Weltweit**

Primärenergiebedarf

Gtöe/Jahr



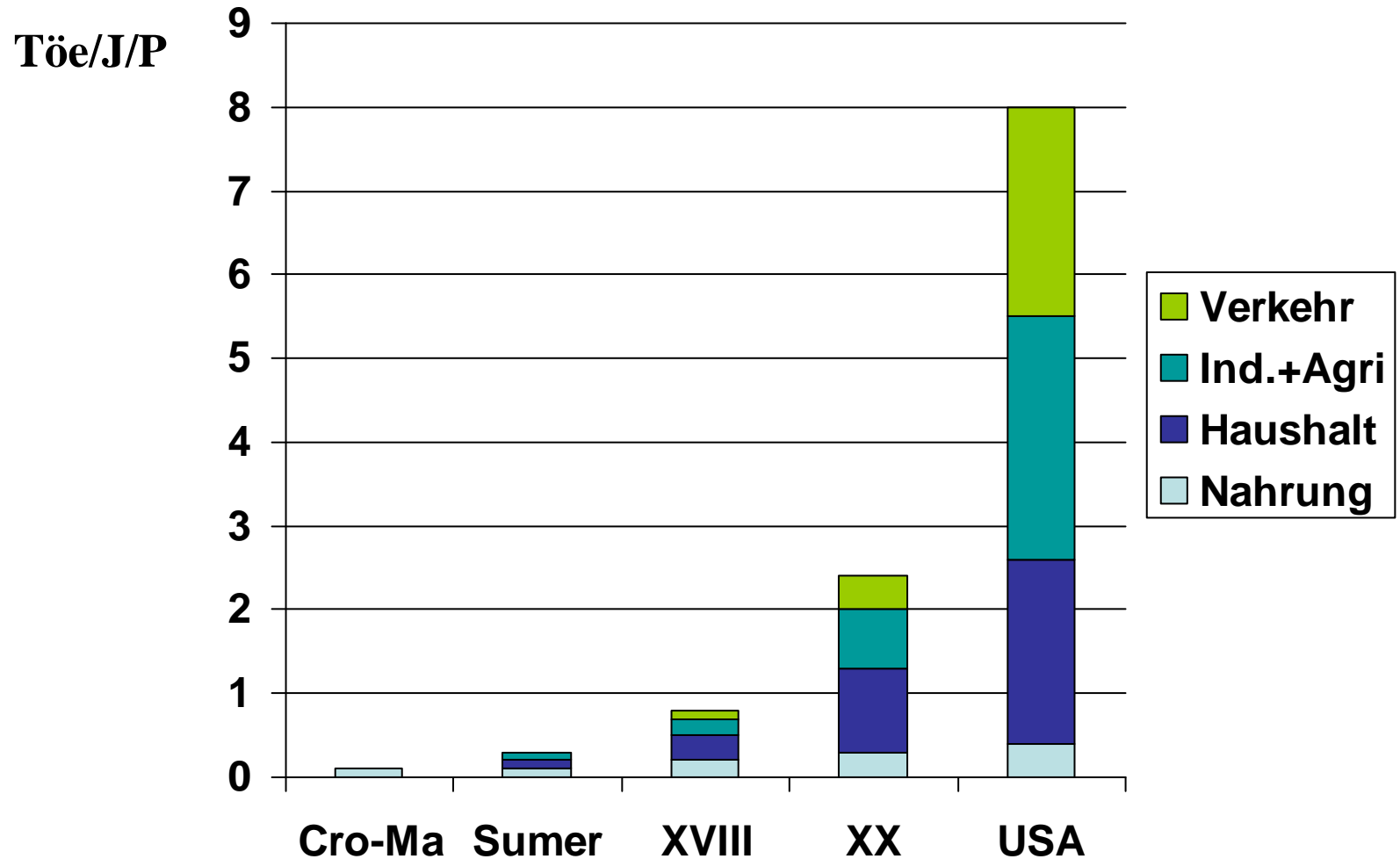
**A: Nachhaltige
Entwicklung**

**B: Durchschnittliche
Entwicklung**

**C: „Ökologische“
Entwicklung**

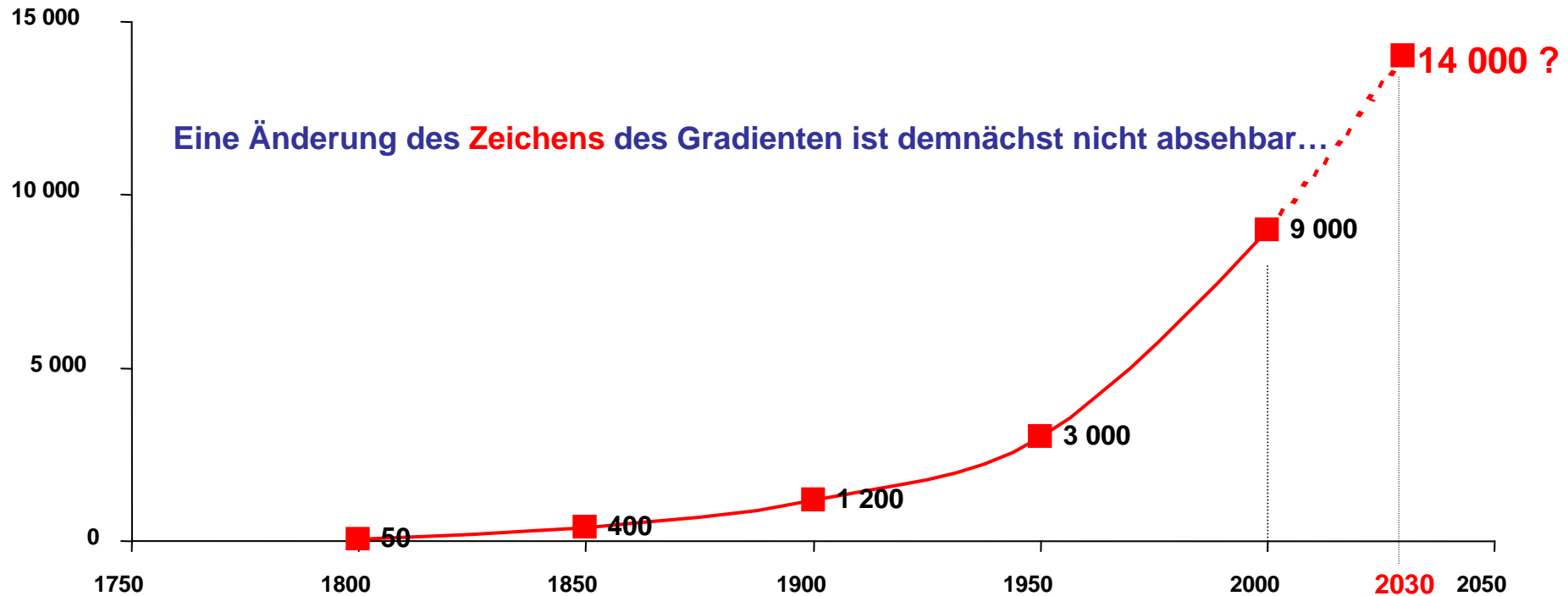
Quelle: IIASA/WECC Studie "Global Energy Perspectives", 1998

Energie-Geschichte...



Jährlicher Primärenergieverbrauch, weltweit (1750-2030)

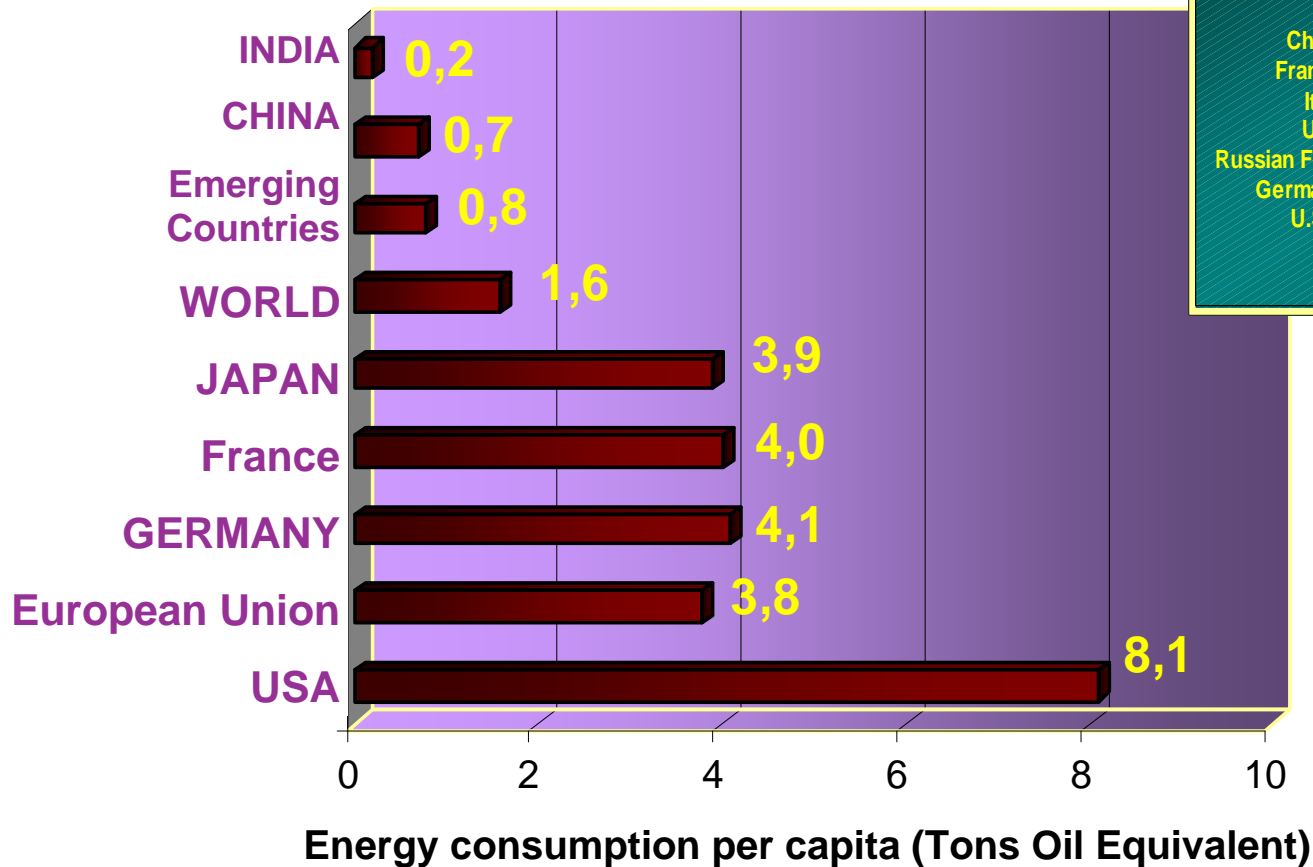
Mtöe



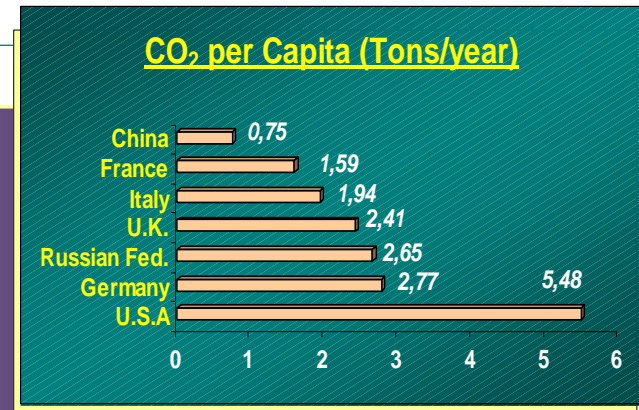
2002

Quelle: DGEMP

Eklatante, nicht-nachhaltige Unterschiede...



SOURCE : IAEA , 2002

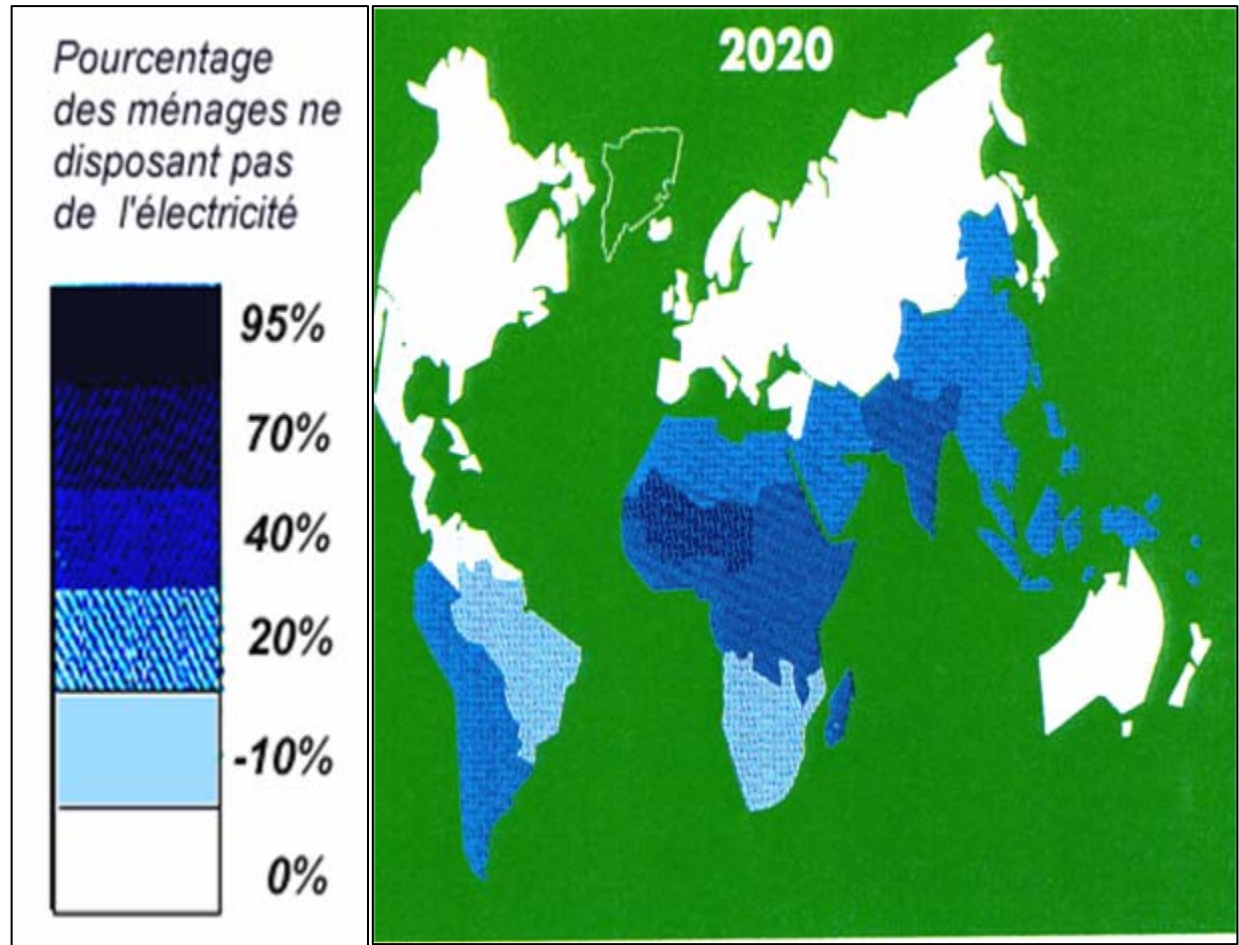


Energie ist lebenswichtig...

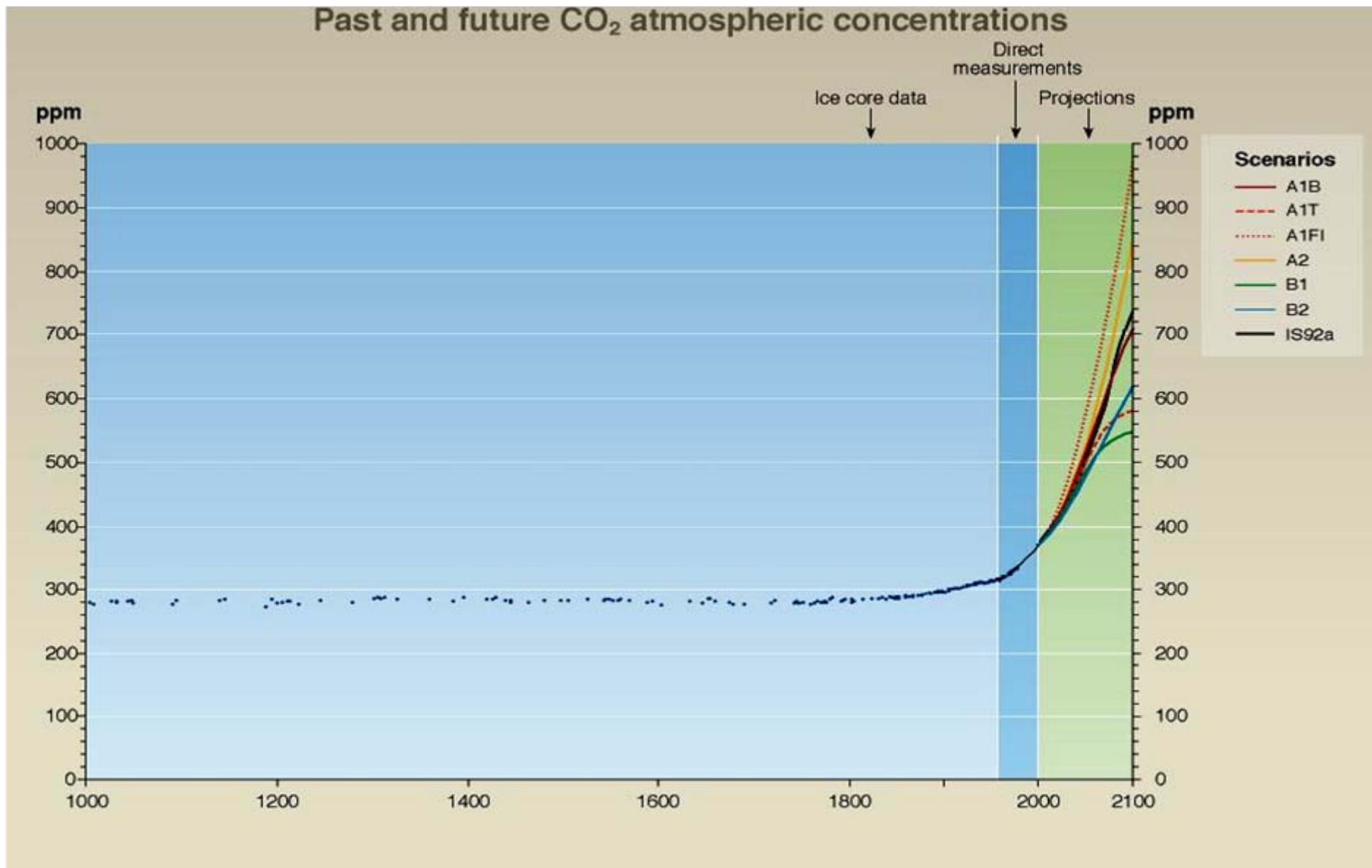
Ein Afghane verbraucht
150 mal weniger Energie
als ein Europäer

20 % der Bevölkerung
verbraucht 60% der
erzeugten Energie

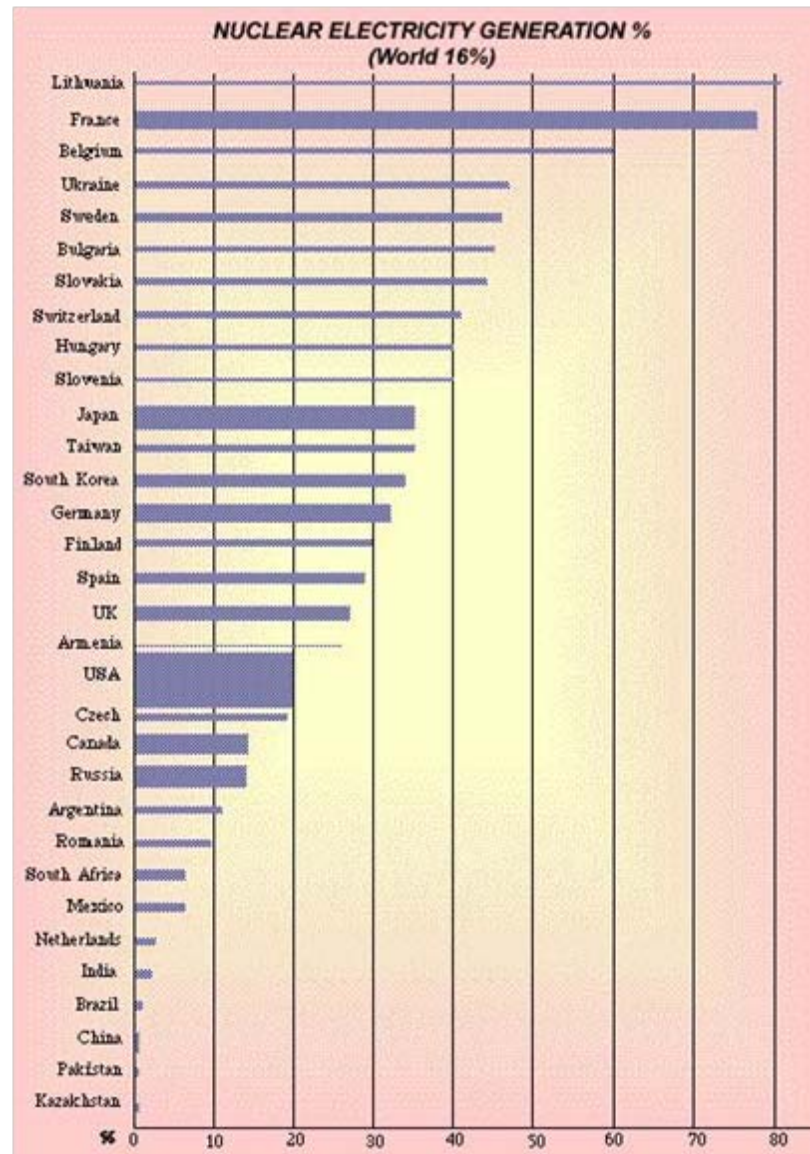
1,6 Milliarden Menschen
leben ohne Elektrizität



Die im XXI-Jahrhundert erwarteten CO₂-Konzentrationen könnten 2 bis 4 mal höher sein als vor der Industriezeitalter



Part du nucléaire dans la production électrique



Warum könnte die Kerntechnik eine noch wichtigere Rolle demnächst spielen?

- ✓ Keine CO₂ Emissionen
(Einsparungen heute: 600 Mt CO₂ /J) ...
- ✓ Versorgungssicherheit...
- ✓ Minderung von Wirtschaftlichen und Politischen Spannungen...



- Wasserstoffherzeugung für Verkehr?
- ✓ Wirtschaftliche Energiequelle....

✓ Sicherheit, Zuverlässigkeit...
(über 10 000 Reaktor-Jahre Betrieb)



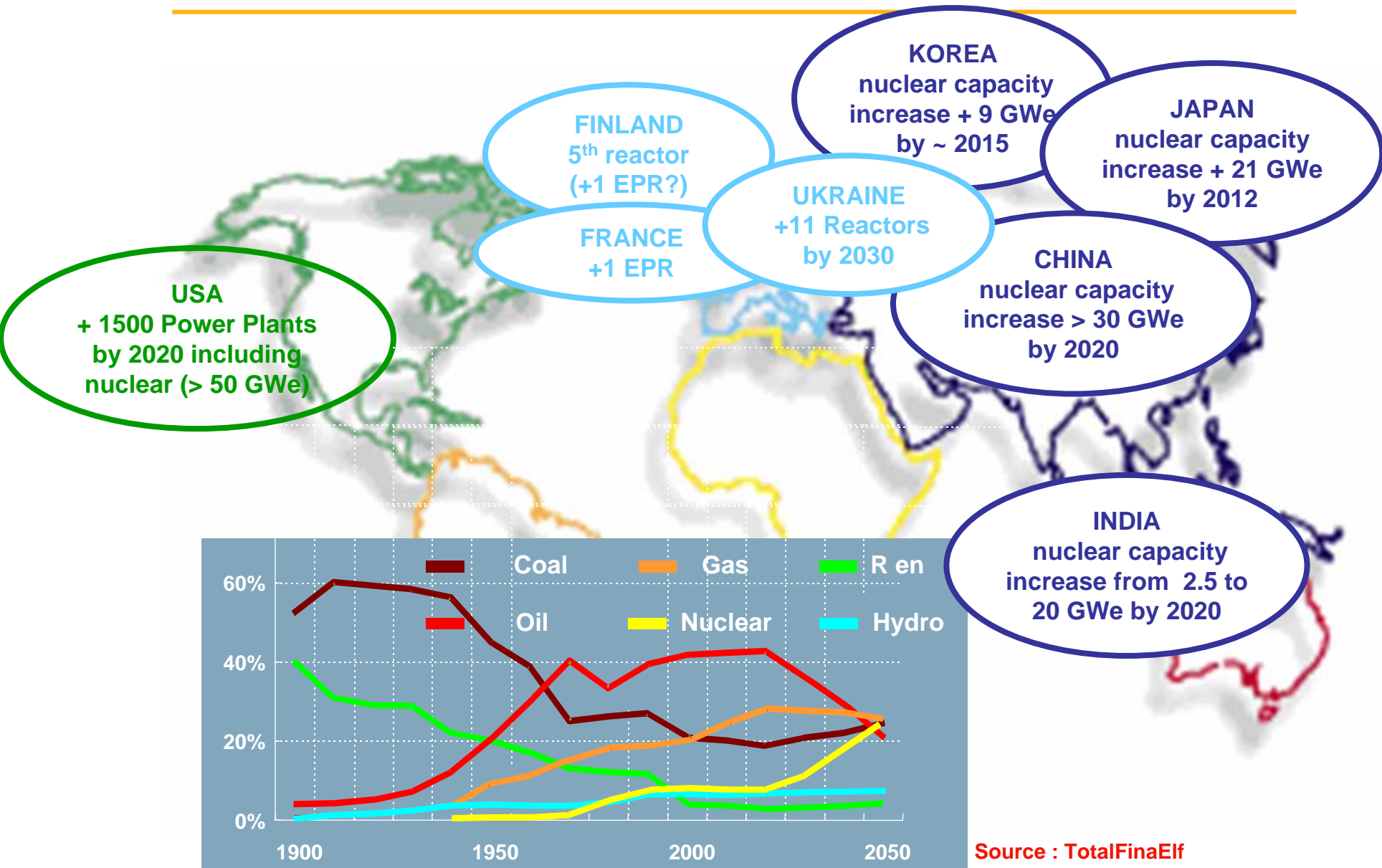
Vor- und Nachteile der Kernenergie:

Vorteile	Nachteile
Energie-Unabhängigkeit Langzeit-Versorgung Wirtschaftlichkeit Umweltschonung	Hohe Kapitalinvestitionen Strahlungsangst (kleine Dosis) Schwere Unfälle (geringe Wahrscheinlichkeit) Endlagerung Weitergabe von Kernwaffen

Alterung von Kernkraftanlagen...

Land	Zahl Reaktoren	Durschn. Alter (Jahre)
USA	104	28
Frankreich	58	18
Japan	53	18
Vereinigtes Königreich	31	29
Deutschland	19	22
Schweden	11	24
Belgien	7	23
China	7	5
Finnland	4	23

Pläne Weltweit ...



Vorräte an Natururan :

Konventionelle bekannte Vorräte (1999)

≤ 130 \$/kg d'U	3954 kt
≤ 80 \$/kg d'U	3002 kt
≤ 40 \$/kg d'U	1254 kt

...Jährlicher Bedarf: ca. 60 kt

Geschätzte Vorräte

≤ 130 \$/kg d'U	2964 kt
≤ 80 \$/kg d'U	2274 kt
≤ 40 \$/kg d'U	916 kt

...Vorräte für ca. 100 Jahre, mit vorhandenen Technologie, und Preis unter 80\$/kg.

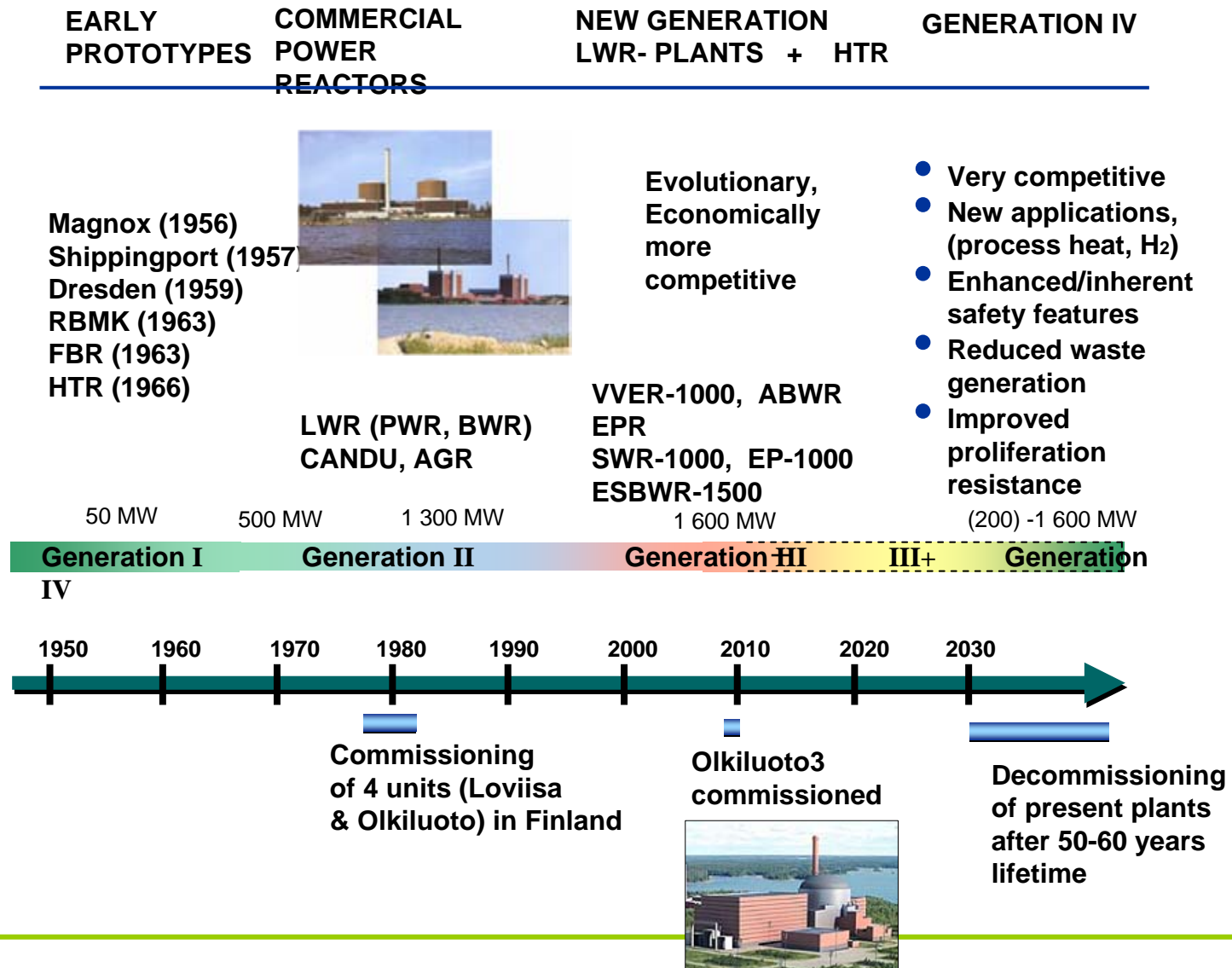
Zusätzliche Geschätzte Vorräte

≤ 130 \$/kg d'U	990 kt
≤ 80 \$/kg d'U	728 kt
≤ 40 \$/kg d'U	338 kt

...Über 10 000 Jahre mit Schnellen Reaktoren

-
- **Einleitung: Kernkraftwerken und Brennstoffkreislauf derzeit**
 - **Energielage weltweit: welche Rolle für Kernenergie?**
 - **Reaktorgenerationen III und IV:
Forschungs- und Entwicklungspläne
Europa- und Weltweit**

Evolution of nuclear power systems: from Generation I (1950s) through the future Generation IV

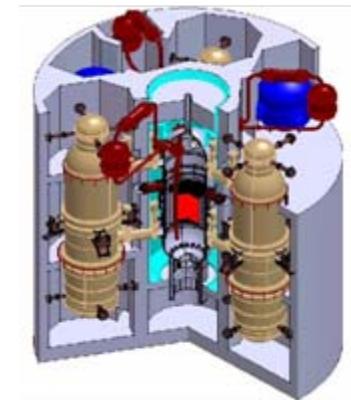


Kerntechnik: Hauptrichtungen für Forschung



- Unterstützung der **LWR- Industrie**
- Erfindung von akzeptablen und wirkungsvollen Lösungen für die **Entsorgung** hochaktiver und langlebiger **Abfall**
- Tieferes Verständnis der kerntechnischen Einflüssen auf Mensch und Umwelt

- Konzipieren und bewerten von **neuen kerntechnischen Systemen** (Reaktoren und Brennstoffzyklen) der Generationen III+ und IV



F&E zur Unterstützung der LWR- Industrie

**Lebensdauer
Verlängerung,
Zuverlässigkeit
Erhöhung...**



Kosten senken...



**Anpassung der
LWR- Industrie an
neuen
Brennstoffen
(MOX, höher
Abbrand,...)**



Abfallfolgenminderung...



Die Liste „Near Term Deployment“ des Int. Forums „Generation IV“ definiert folgende Kernkraftwerke als „Generation III /III+“:

Fortgeschrittene DWR:

AP 600, AP 1000, APR1400, APWR+, EPR

Fortgeschrittene SWR:

ABWR II, ESBWR, HC-BWR, SWR-1000

Fortgeschrittener „Schwer-Wasser Reaktor“:

ACR-700 (Advanced CANDU Reactor 700)

„Integrierte“ Klein- und Medium- Kraft Reaktoren:

CAREM, IMR, IRIS, SMART

Hoch-Temperatur- Gasgekühlte Modulare Reaktoren:

GT-MHR, PBMR

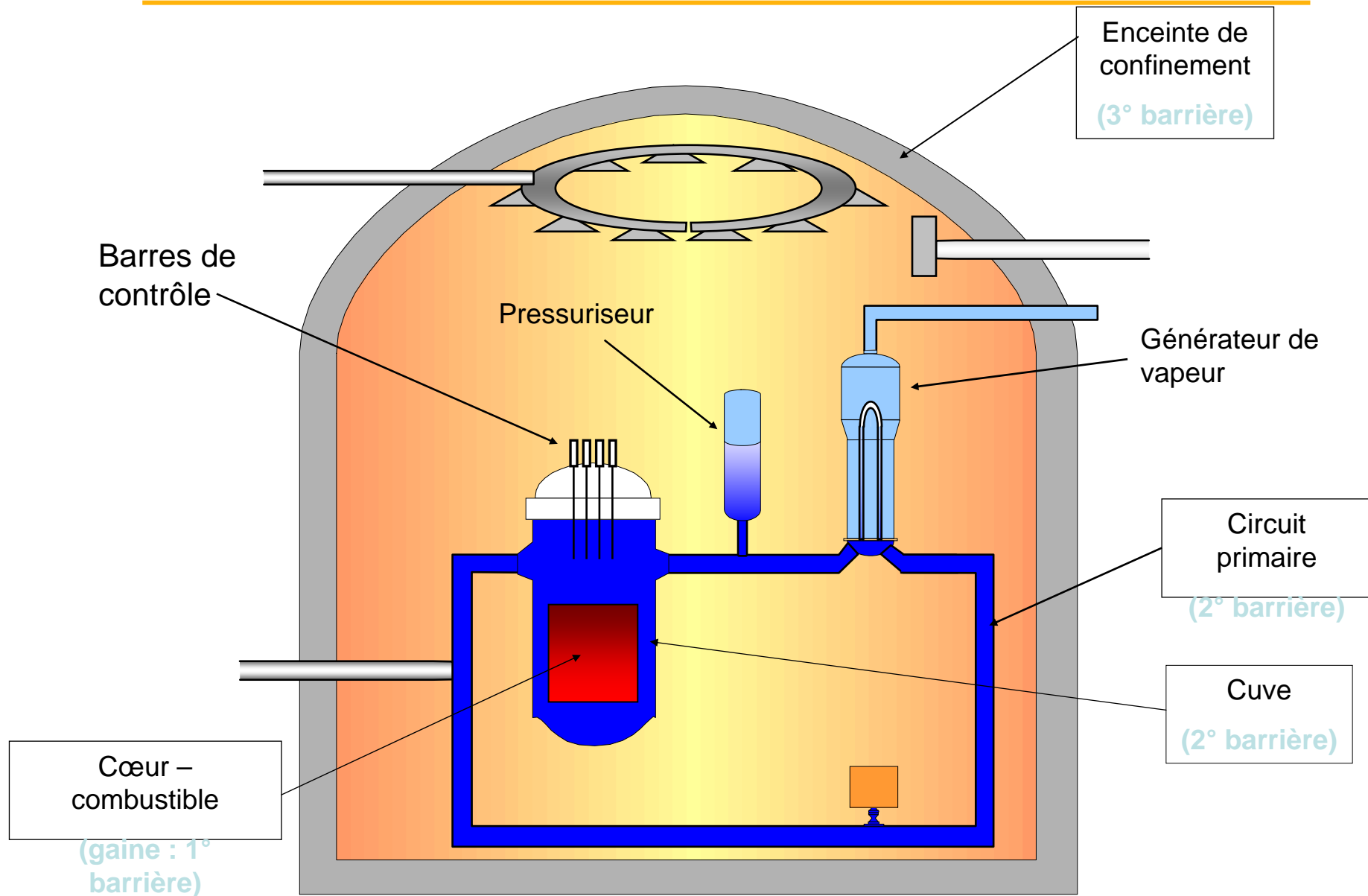
Principales caractéristiques		EPR	N4
Puissance thermique	MW	4250/4500	4250
Puissance électrique	MW	De 1500 à 1600	1450
Rendement	%	36	34
Nb boucles primaires		4	4
Nb assemblages comb.		241	205
Taux de combustion*	GWj/t	> 60	45**
Pression secondaire	bar	78	71
Niveau sismique	g	0,25	0,15
Durée de vie technique	années	60	40

* Taux de combustion moyen des recharges

** Compte tenu du taux de combustion maximum des assemblages aujourd'hui autorisé par l'AS



Les 3 barrières du REP

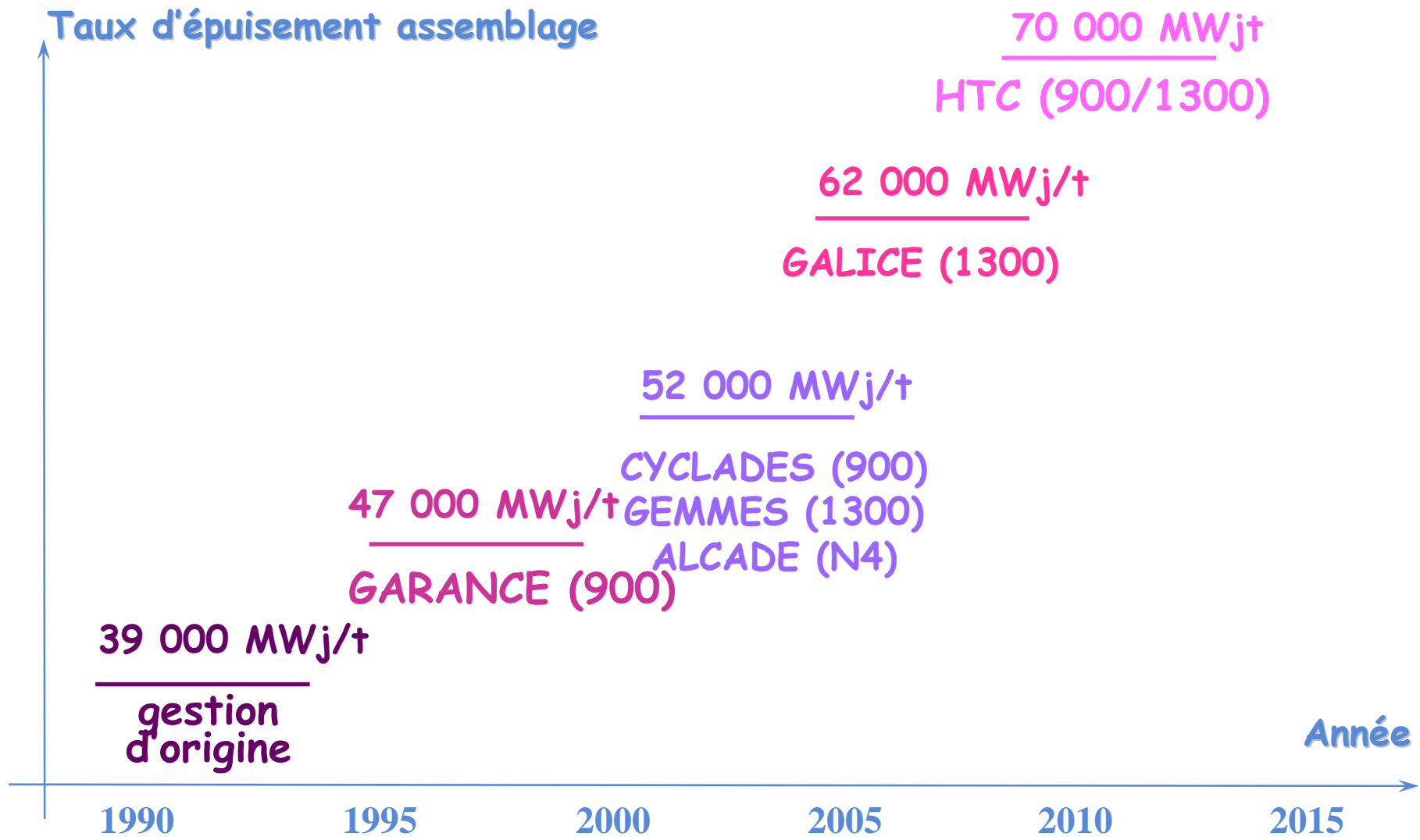


Der EPR (European Pressurized Reactor)



Source: AREVA

L'évolution des gestions de coeur implique des recherches sur le comportement du combustible à fort taux de combustion



Sicherheitserhöhung beim EPR

➤ "Bunkerisierung"

Isolierung von Gebäuden

Schutz/Sicherheit

➤ Reaktor Abkühlung

4 unabhängige (RRA) Kühlkreisläufe (1 reicht aus)

Redundanz

On-line Verfügbarkeit

Verfügbarkeit

➤ Vereinfachung

Sicherheitseinspeisung + RRA = dasselbe System

Schutz/Sicherheit

Mehr Wasserreserve im Druckerzeuger

Modernes Leitsystem

➤ Corium Corecatcher

Keine Radioaktivitätsfreisetzung

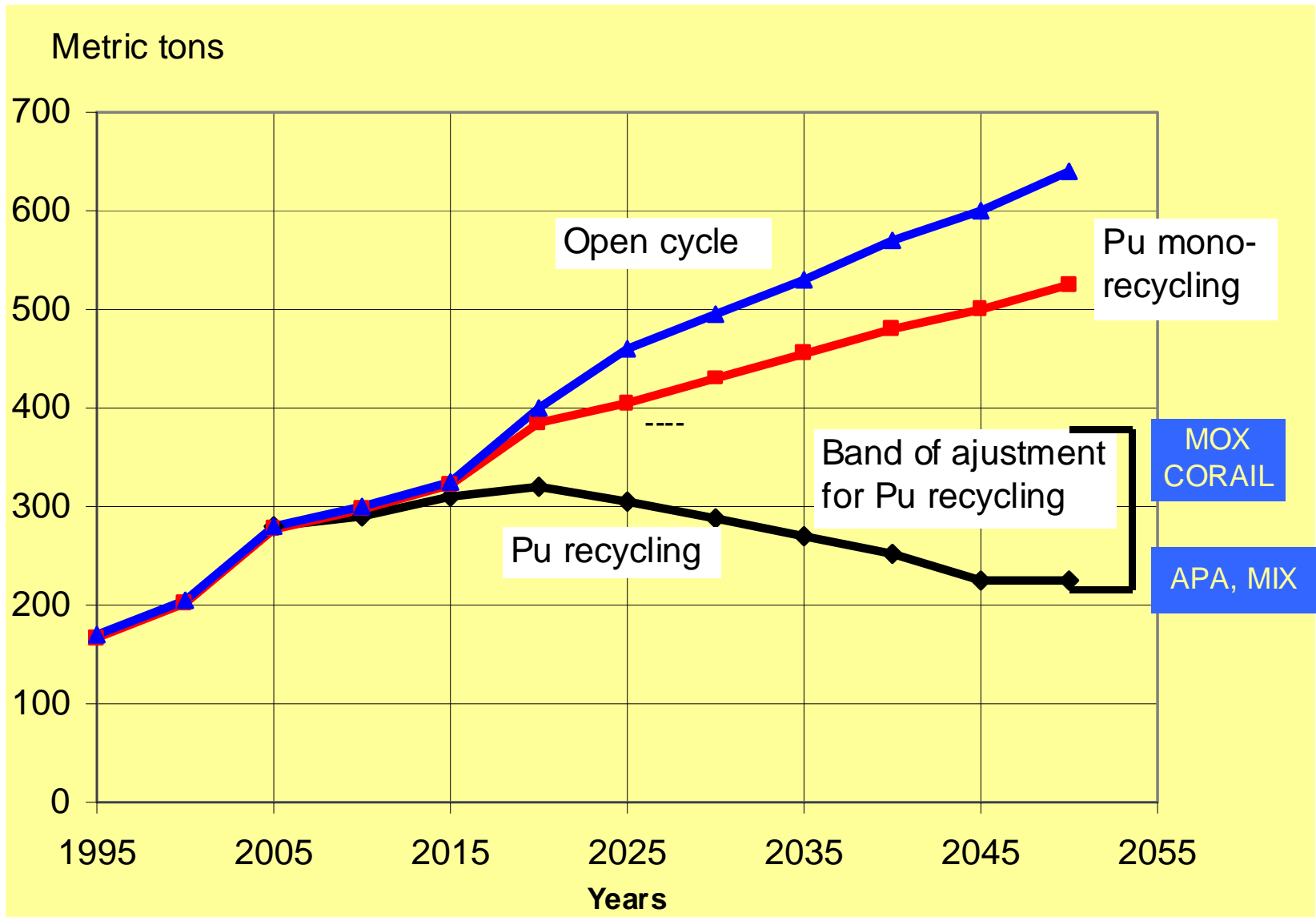
➤ Abgedichteter Liner

Wasserstoffexplosion- Beherrschung

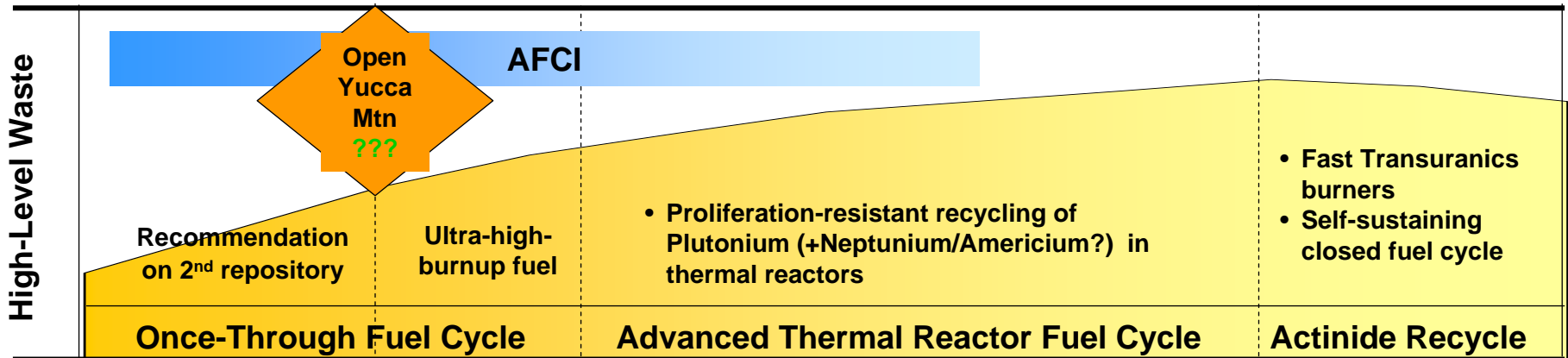
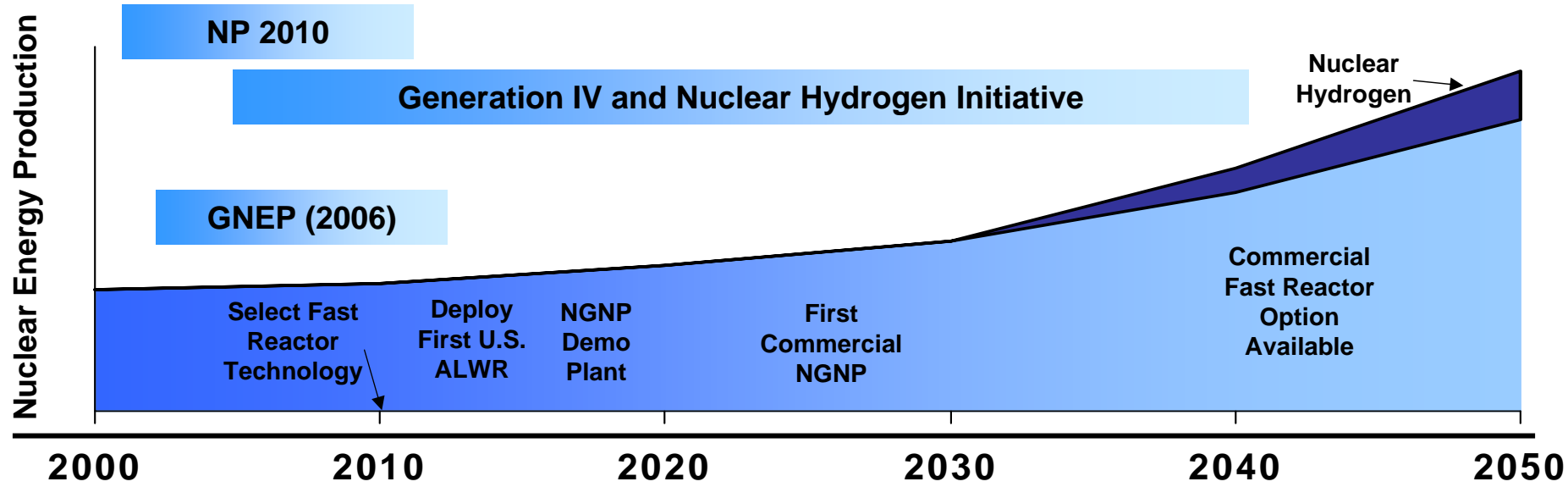
➤ Beherrschung Erdbeben-Risiko

➤ Beherrschung Flugzeugabsturz-Risiko

Plutonium Rückführung mit LWR- Zyklus



„Kernenergetische Vision“ in USA



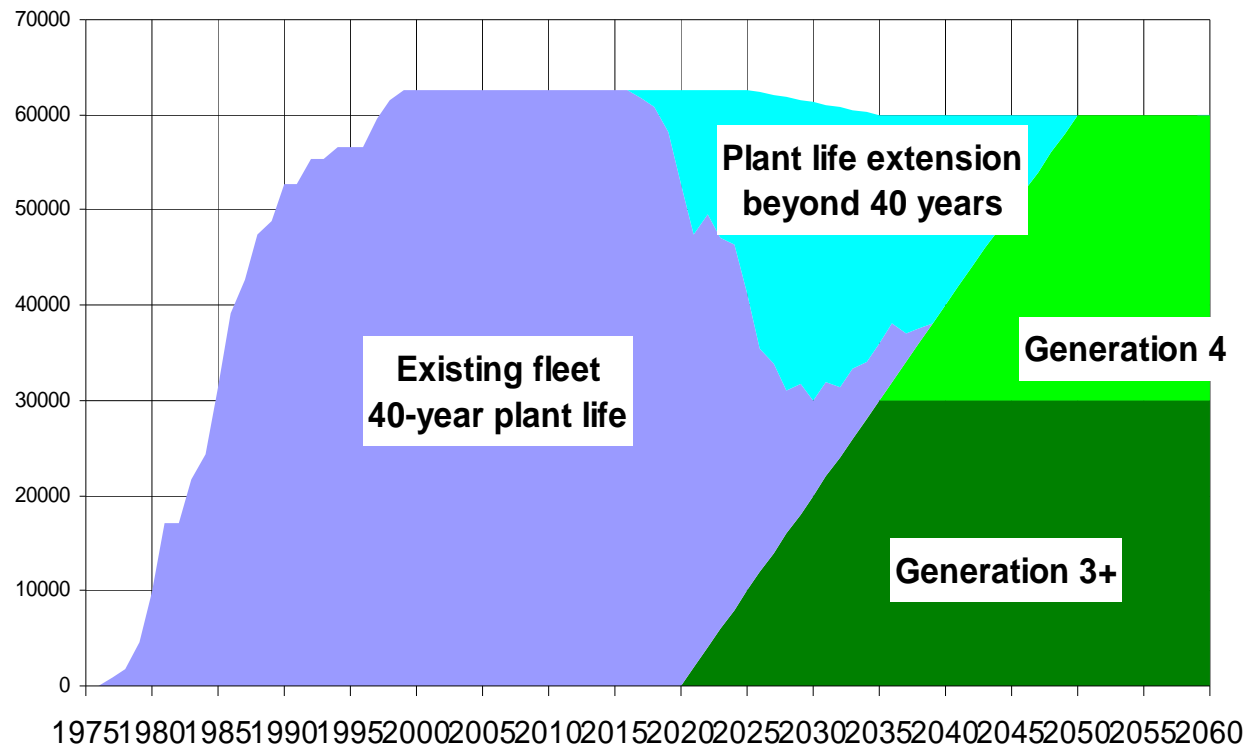


Strategie für Kernenergieentwicklung in Frankreich (EDF)

➤ Überwiegende Rolle für LWR während des 21. Jahrhunderts

- ❖ Vorhandene DWR (Gen II): Lebensdauerverlängerung (> 40 ans)
- ❖ DWR Gen III/III+ : Ersetzung von vorhandenen DWR gegen 2015; Betrieb bis Ende des 21. Jahrhunderts

➤ Übergang von LWR zu Schnellen Reaktoren



Average plant life : 48 years

Source : EDF, ENC 2002



Ziele des Int. Forum Generation IV (GIF)

Kerntechnische Systeme für nachhaltige Energieentwicklung

- **Technologische Reife um 2030**
- **Fortschritte (Fortsetzung von Gen III)**
 - Wirtschaftlichkeit
 - Sicherheit und Zuverlässigkeit
 - Abfallminimierung
 - Ressourcenschonung
 - Nichtweitergabe und Schutz/Sicherung
- **Alternative Anwendungen**
 - Elektrizität, Wasserstoffherzeugung,
 - Entsalzung, Wärme

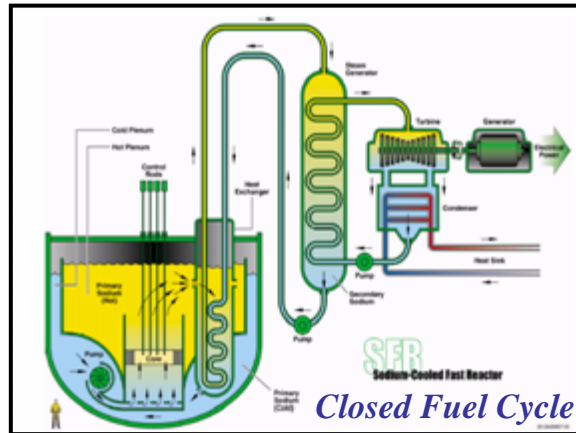


Auswahl Kriterien für zukünftige Kerntechnische Systeme

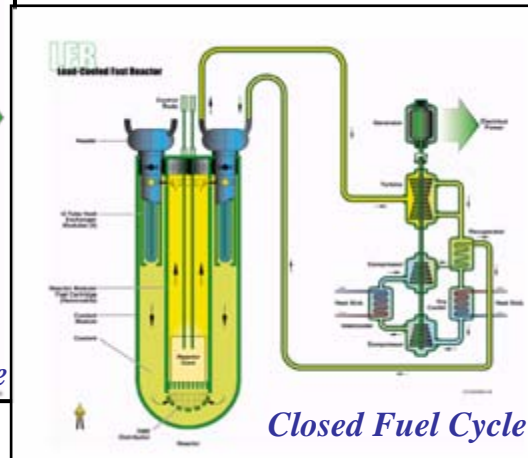
5 fundamentale Kriterien



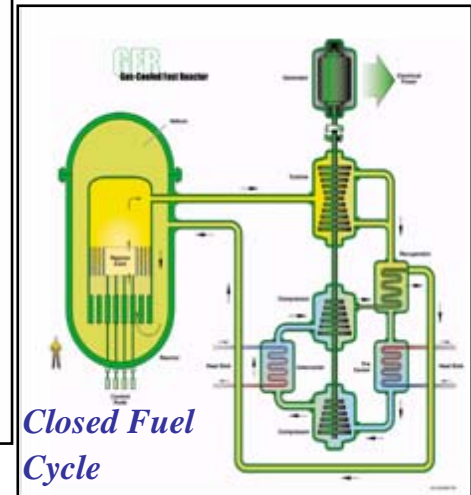
6 Innovative Konzepte



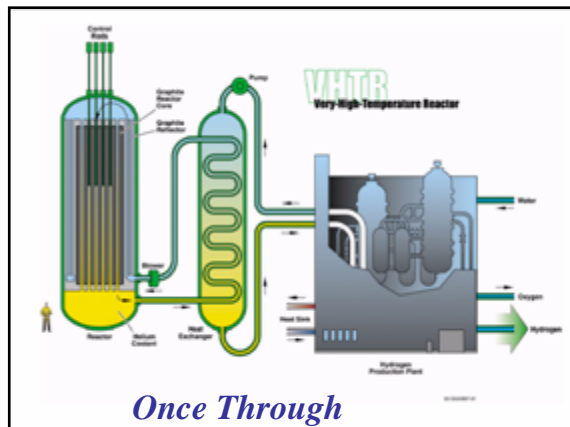
Sodium Fast reactor



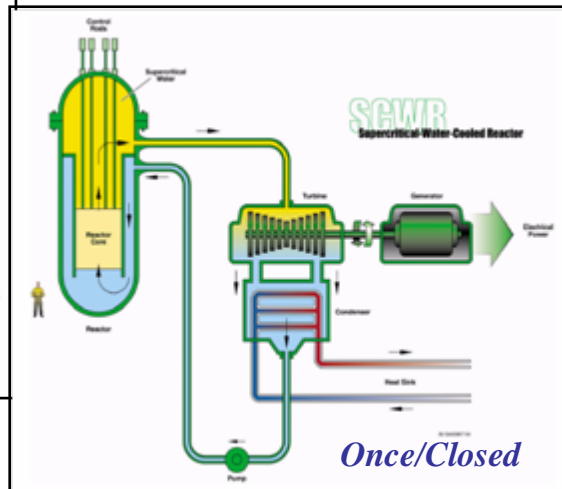
Lead Fast Reactor



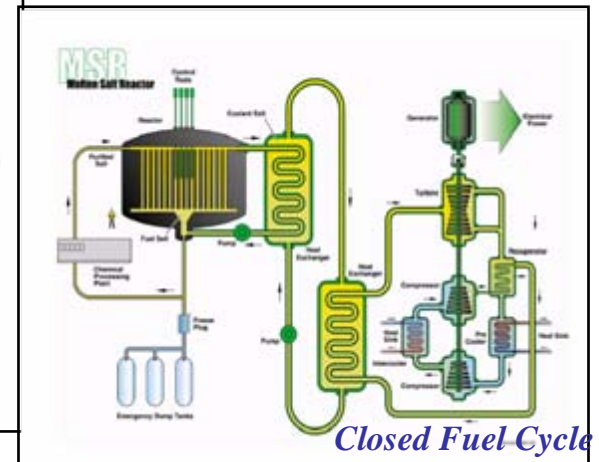
Gas Fast Reactor



Very High Temperature Reactor

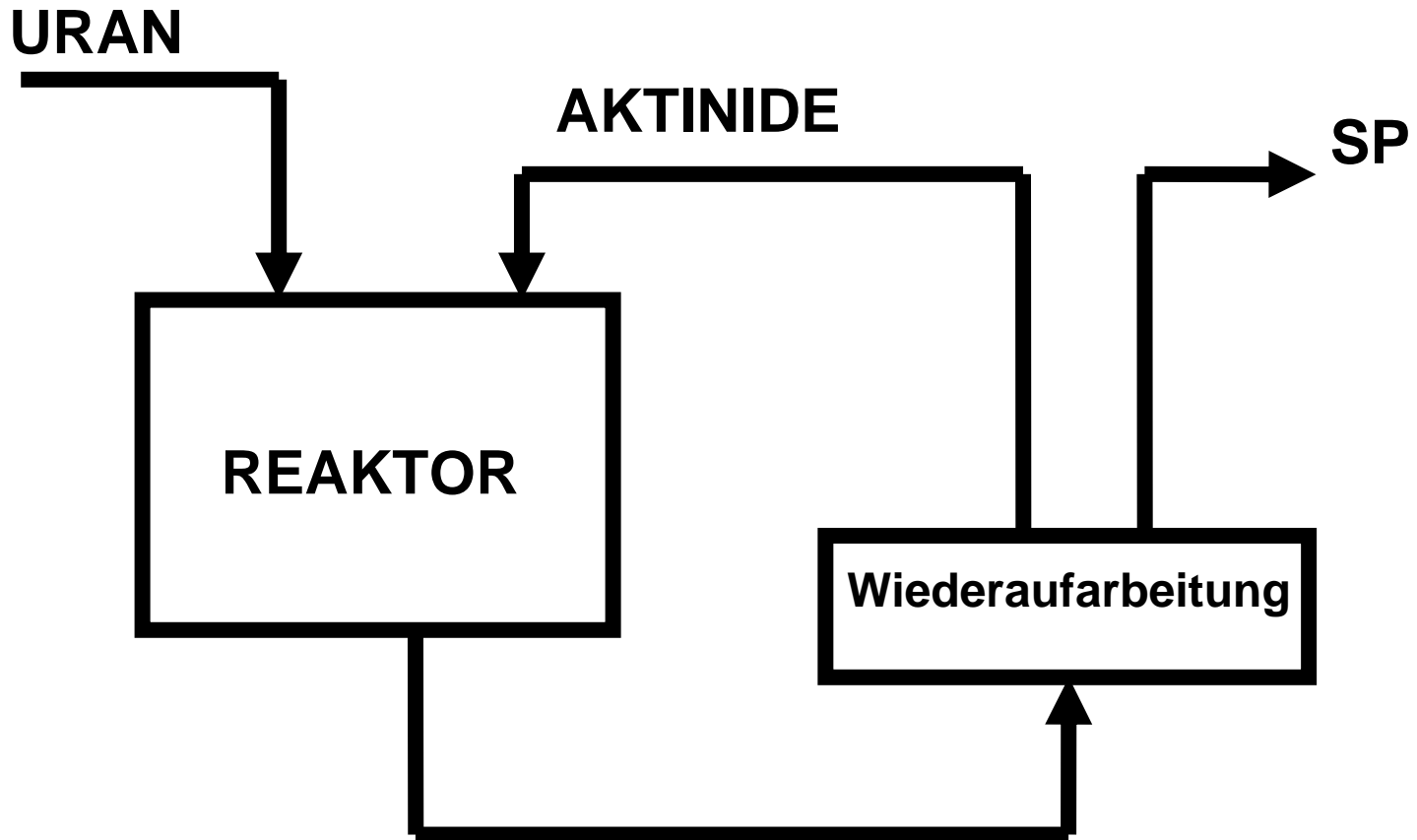


Supercritical Water Reactor



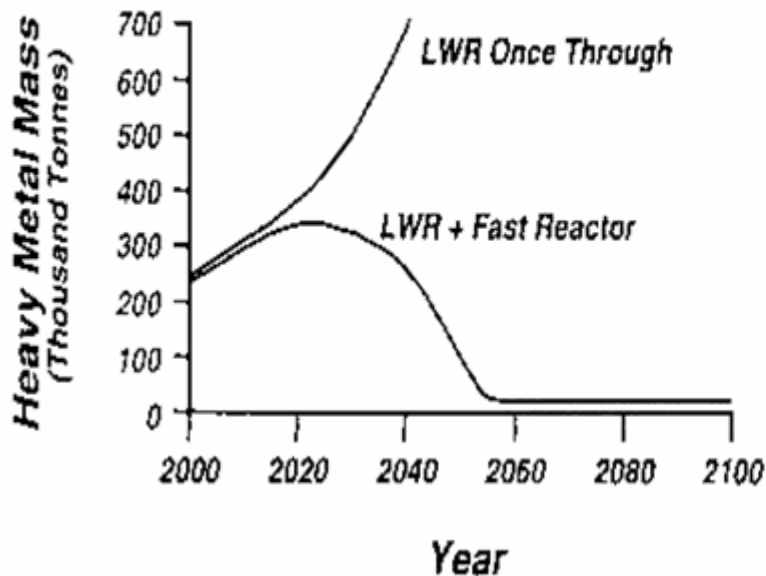
Molten Salt Reactor

Prinzipschaltbild des Brennstoffkreislaufs im Schnellen Reaktor: Reaktorbau und Wiederaufarbeitungsverfahren sind sehr eng Zusammengekoppelt

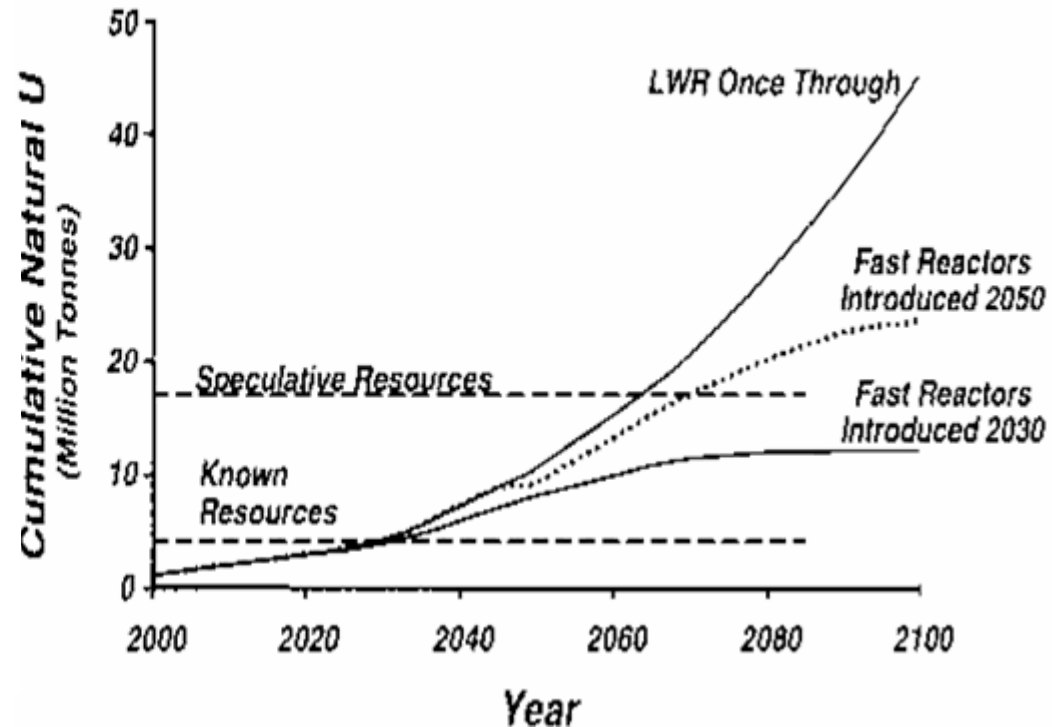


Perspektiven für Nachhaltigkeit...

Worldwide Spent Fuel



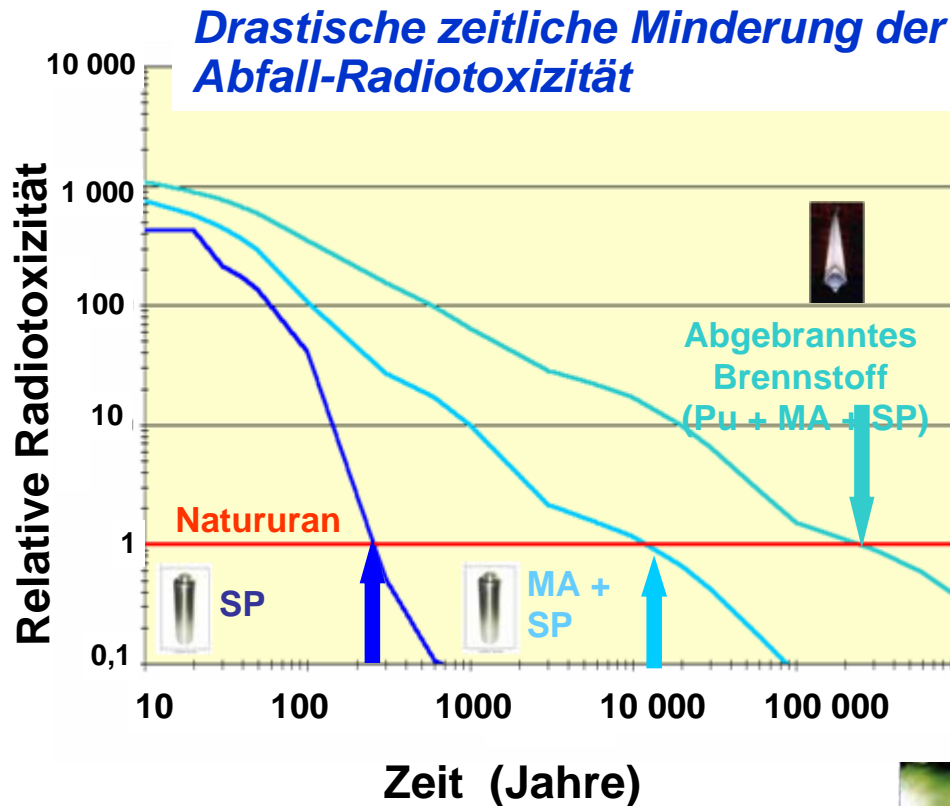
Worldwide Uranium Resource Utilization



Generation IV Roadmap

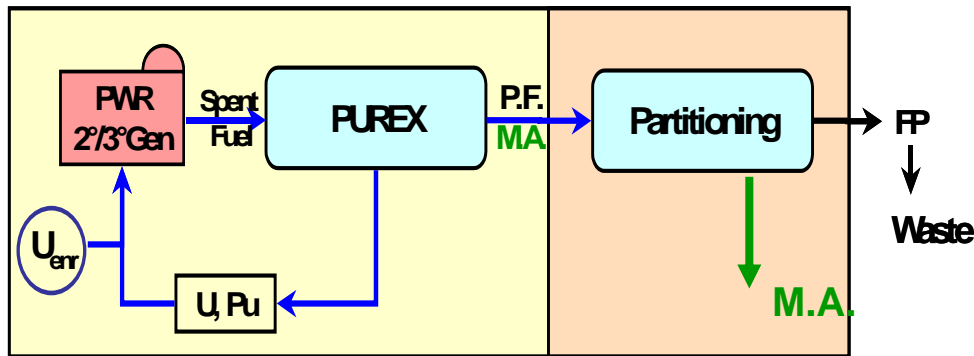
Generation IV : geschlossener Brennstoffkreislauf

Globale Wiederverwertung von nicht- getrennten Aktiniden



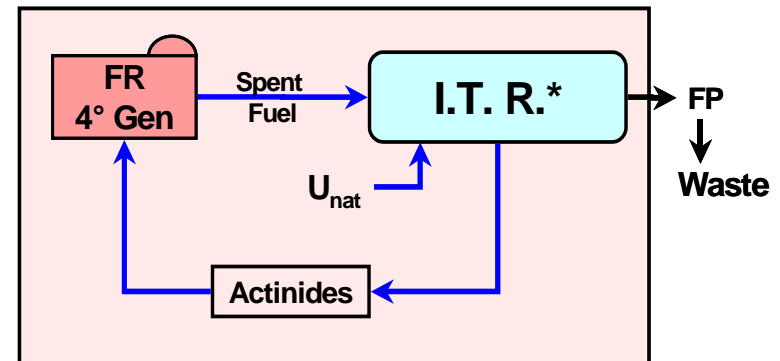
F&E für neue Isotopentrennungungsverfahren

Scénario pour la transition Gen II/III vers Gen IV



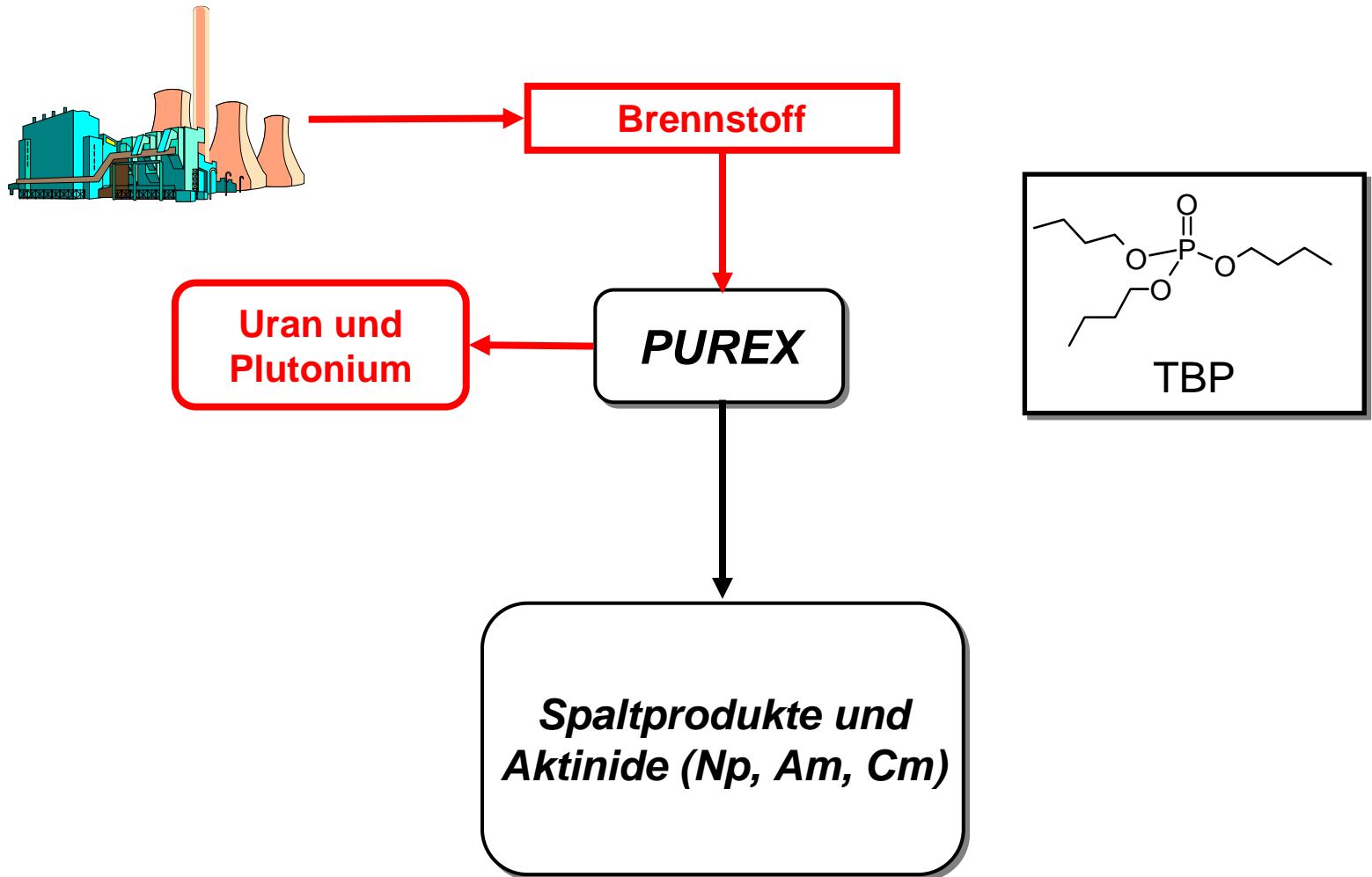
- **Monorecyclage du Pu** (20 PWRs 900 chargés avec 30% de MOX)
- **Séparation et entreposage des AM** pour minimiser la quantité d'AM aux déchets
- **Utilisation maximale des usines du cycle existantes** (La Hague, Melox)

- **Utilisation du stock de Pu** pour déployer les systèmes à neutrons rapides de 4ème génération (> 2035)
- **recyclage des AM entreposés**
- **recyclage intégral de tous les actinides** dans les systèmes de 4ème génération
- **Non Prolifération**

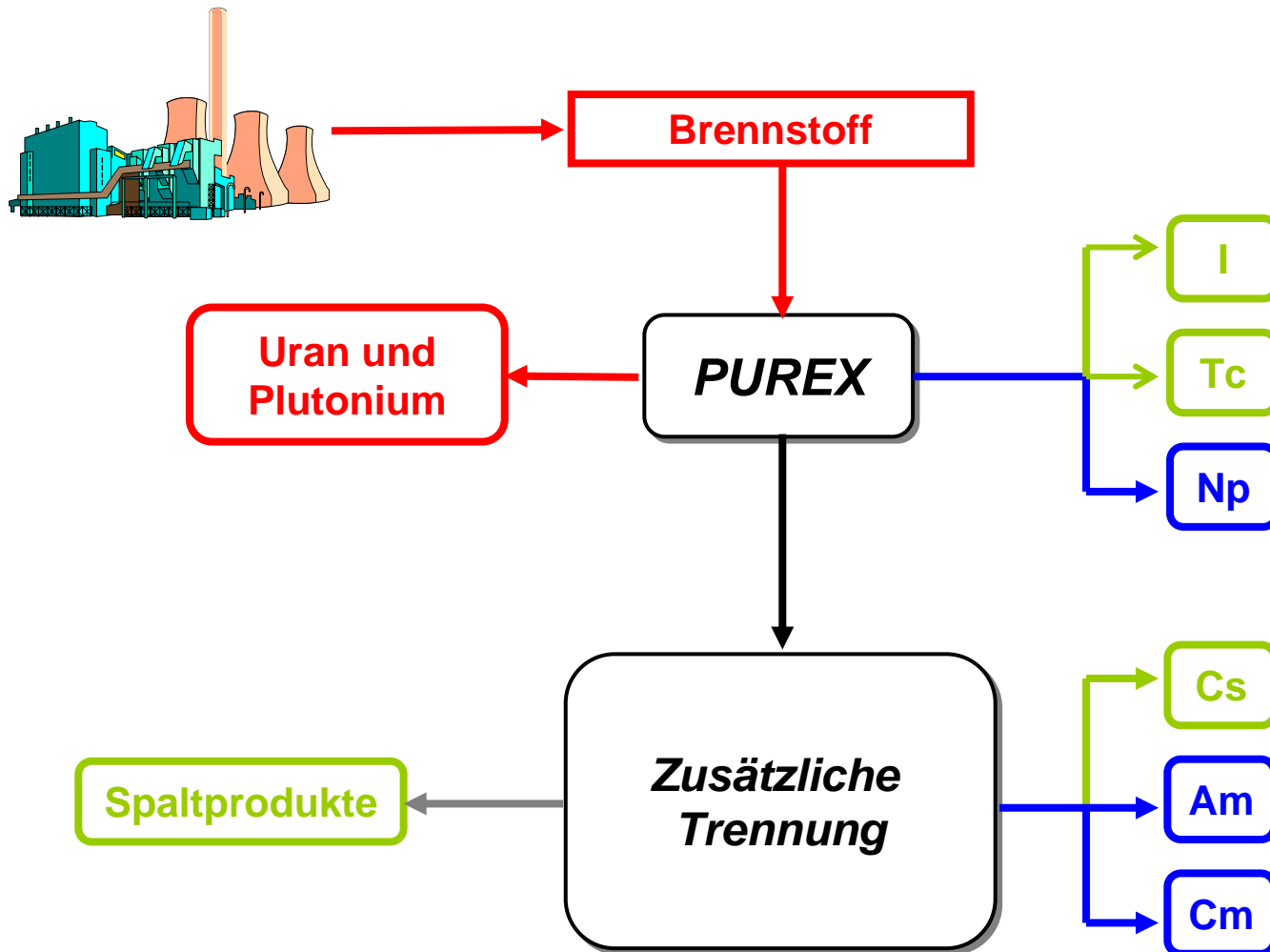


*I.T.R. : Integrated Treatment & Refabrication

Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennstoffelementen



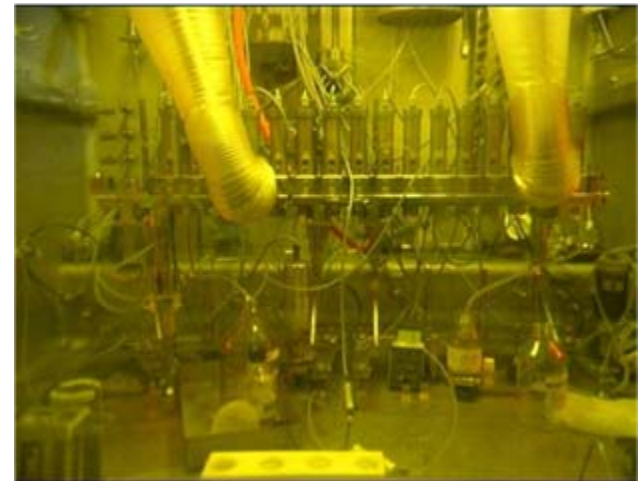
Gruppierte- Isotopentrennung:



F&E in ATALANTE (Frankreich)



...Grundlagenforschung und demonstrative Experimente ...
...Mengen bis Kilos abgebranntes Brennstoff.

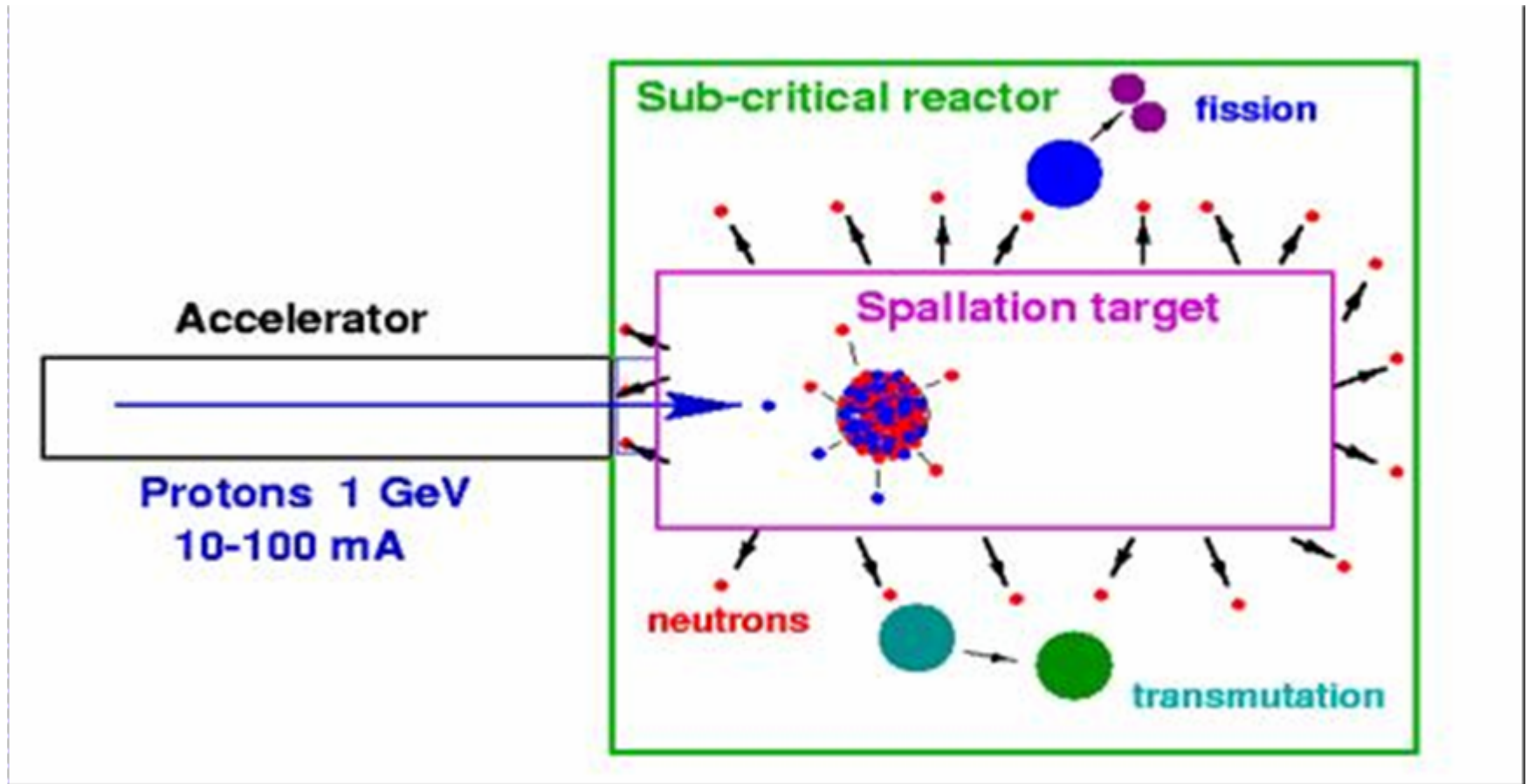


Prinzipien der Transmutation

- **Nutzung von Neutronen- Absorption- oder Spaltungsreaktionen für die Umwandlung von Radionukliden (Aktiniden) in stabilen oder kurzlebigen Isotopen**
- **Konzepte:**
 - **Reaktoren: vorhandene (DWR, SNR) oder zukünftige Technologie (GEN- IV), oder zugeeignete Systeme (ADS)**
 - **Behandlung: Verdünnung im Brennstoff oder Konzentrierung in „Zielscheiben“**



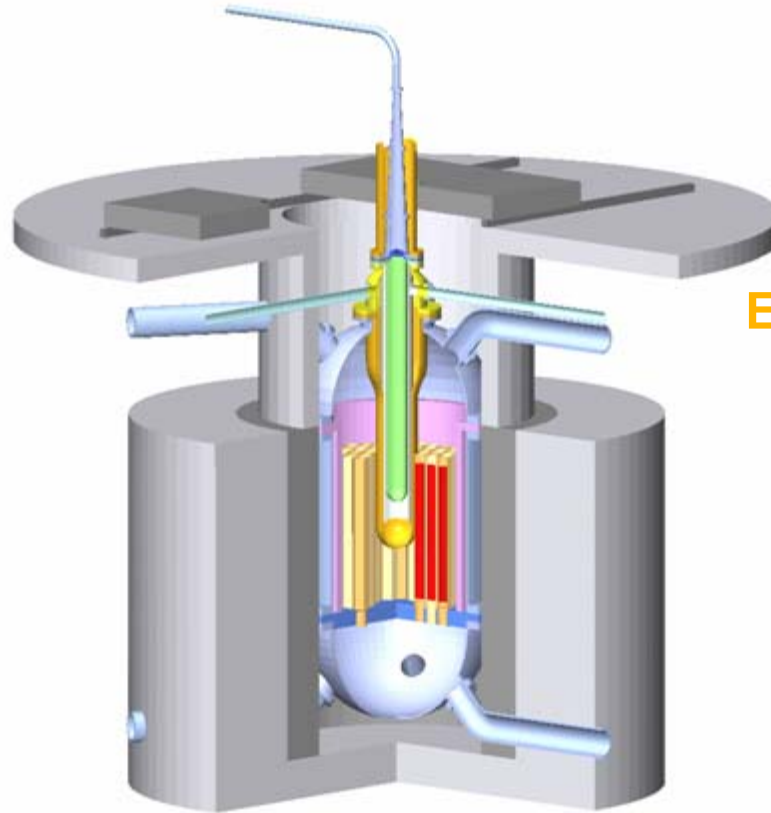
Les ADS : une voie alternative pour la transmutation des actinides





Une voie alternative pour la transmutation des AM

- **Subcritical Accelerator Driven Systems dedicated to transmute M.A.**



High
content
M.A. fuels

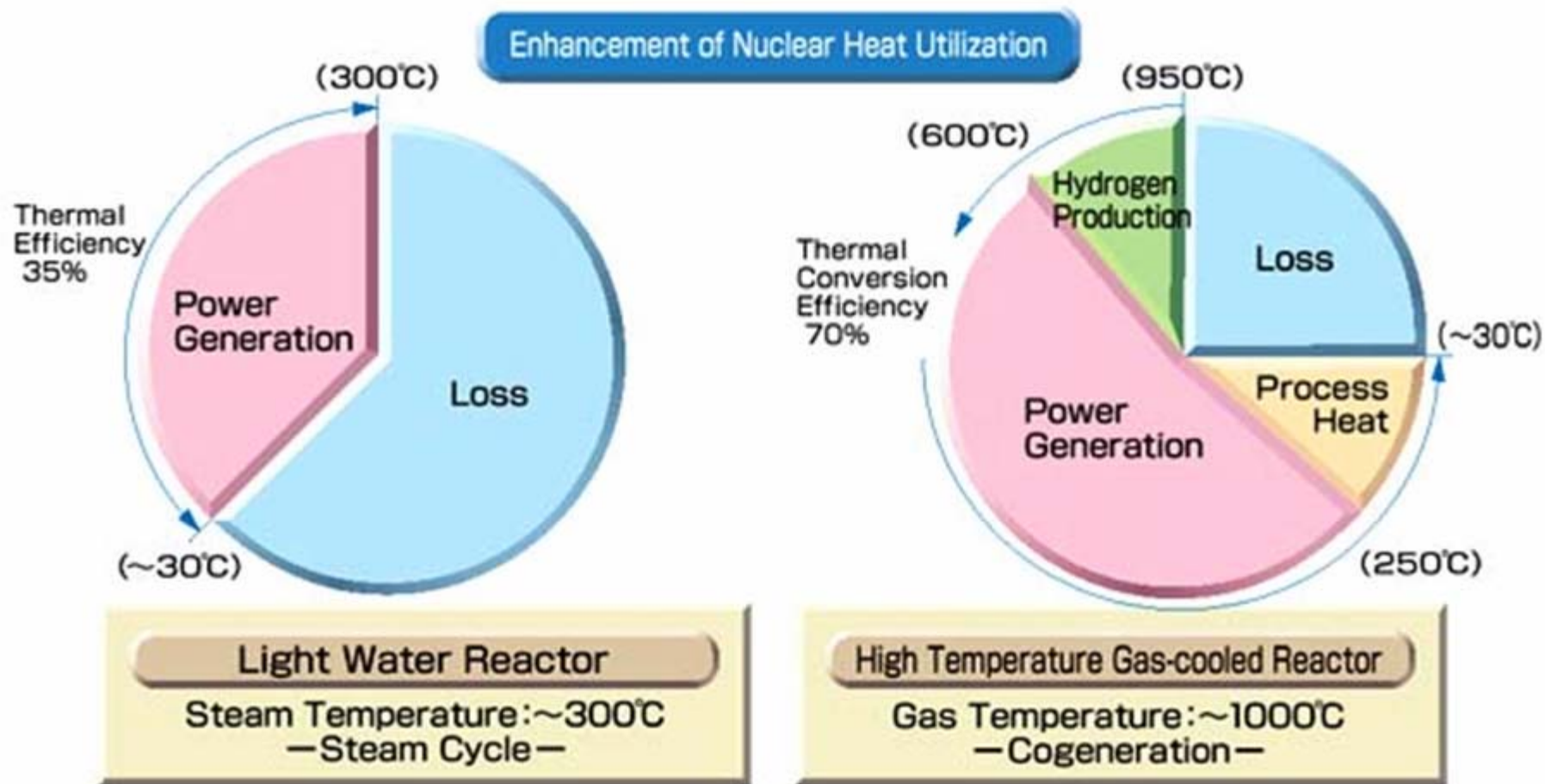
Economical as part of a
large fleet of reactors

R&D for
Sc. & Tech.
feasability

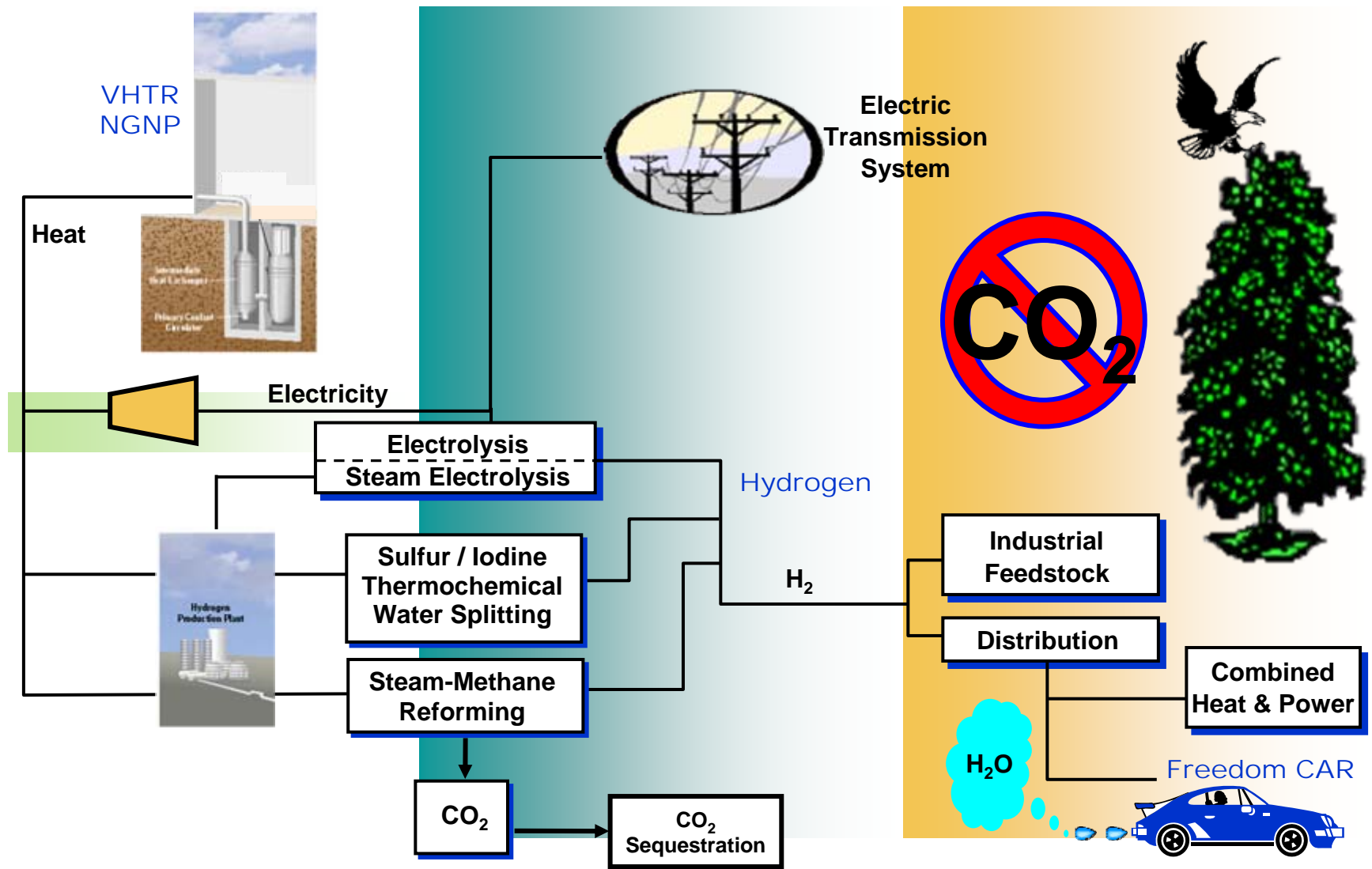
Open technological
issues

Fast spectrum cores, fast
reactor
technologies

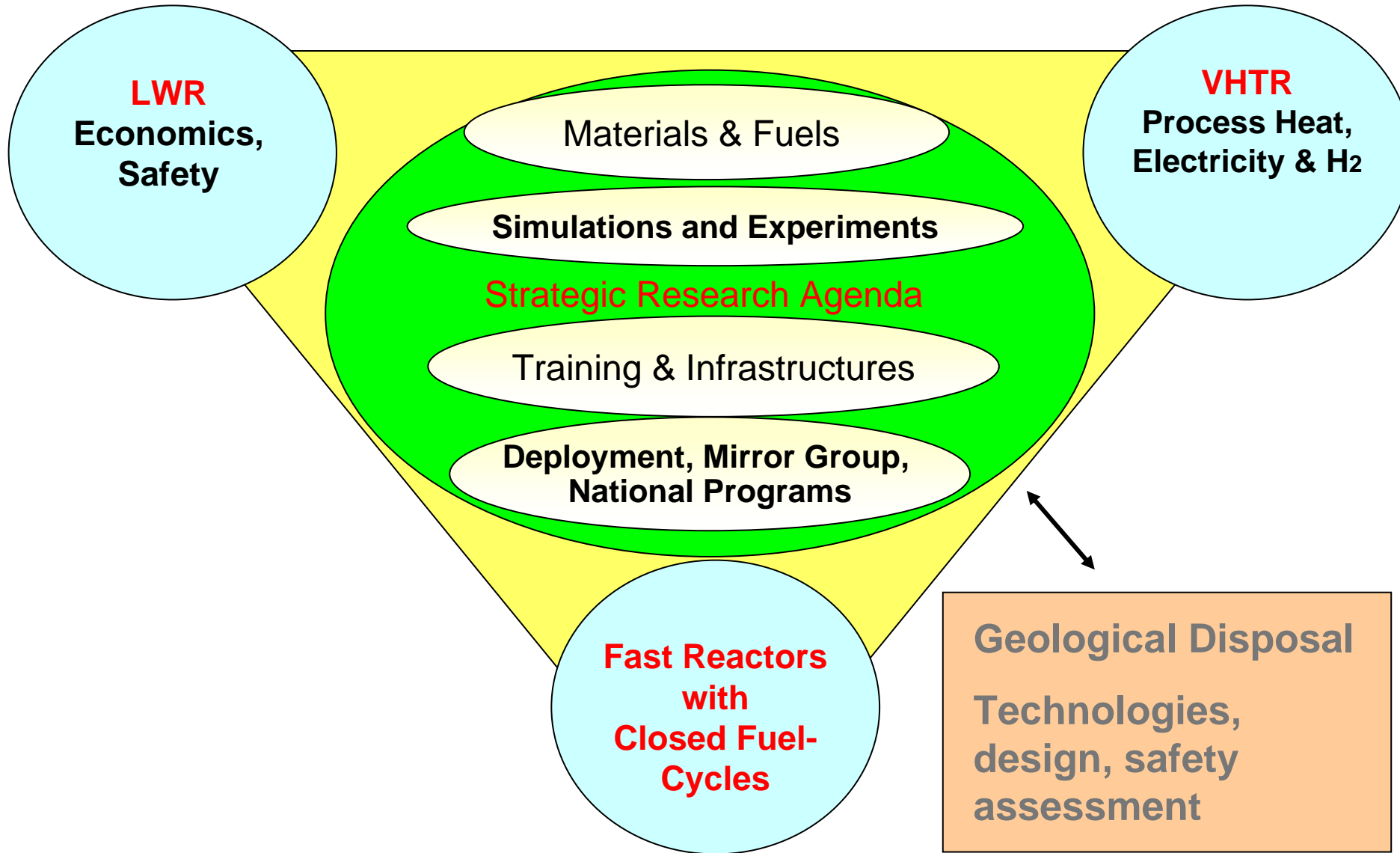
Konzepte für Aufwertung der Nuklearen Wärme...



Die Wasserstoffwirtschaft der Zukunft ? (Vision USA)



EURATOM Sustainable Nuclear Fission Technology Platform



Quo Vadis Kernenergie, nach den ersten 50 Jahren?

- Bewertung Kernenergie: wirtschaftlich, sauber, sicher, zuverlässig, und entwicklungsfähig
- Kerntechnik ist jung (50 Jahre): wesentliche Fortschritte sind definitiv möglich!
- F&E Bedarf (kurz- und mittelfristig):
 - Isotopentrennung & Transmutation von Aktiniden & Spaltprodukten für (einerseits) Spaltstoffrückführung (Energiegewinn) und (andererseits) vereinfachte Entsorgung/Endlagerung der radioaktiven Abfälle
 - Tieferes Verständnis der kerntechnischen Einflüssen auf Mensch und Umwelt
 - Vorbereitung des Übergangs (ca. 2015) von Gen II & III (2007) zu Gen IV (2040)
- Gen-IV Systeme mit schnellen Neutronen und geschlossenen Brennstoffkreislauf...
 - ...Minimieren radioaktive Abfälle
 - ...Lösen das Uran-Ressourcen-Problem
 - ...Erleichtern die Lösung des Problems der Weitergabe von Kernwaffen

Quo Vadis Kernenergie?

- **Unterschiedliche Anwendungen der Kernenergie sind möglich: Elektrizitätserzeugung, Industrielle Wärme, Wasserstofferzeugung, Entsalzung...**
- **Die Weiterentwicklung der Kerntechnik scheint in Asien gesichert zu sein. Im Westen, hängt eine Weiterentwicklung weitgehend von demokratischen Debatten ab. Frankreich und Finnland bauen zur zeit EPR (Gen-III+)**
- **Dennoch ist „DIE ZEIT“ für internationale Zusammenarbeit da!**
- **Global und pragmatisch gesehen, muss die Kernenergie ein wichtiger Teil des weltweiten Energiemix bleiben.**

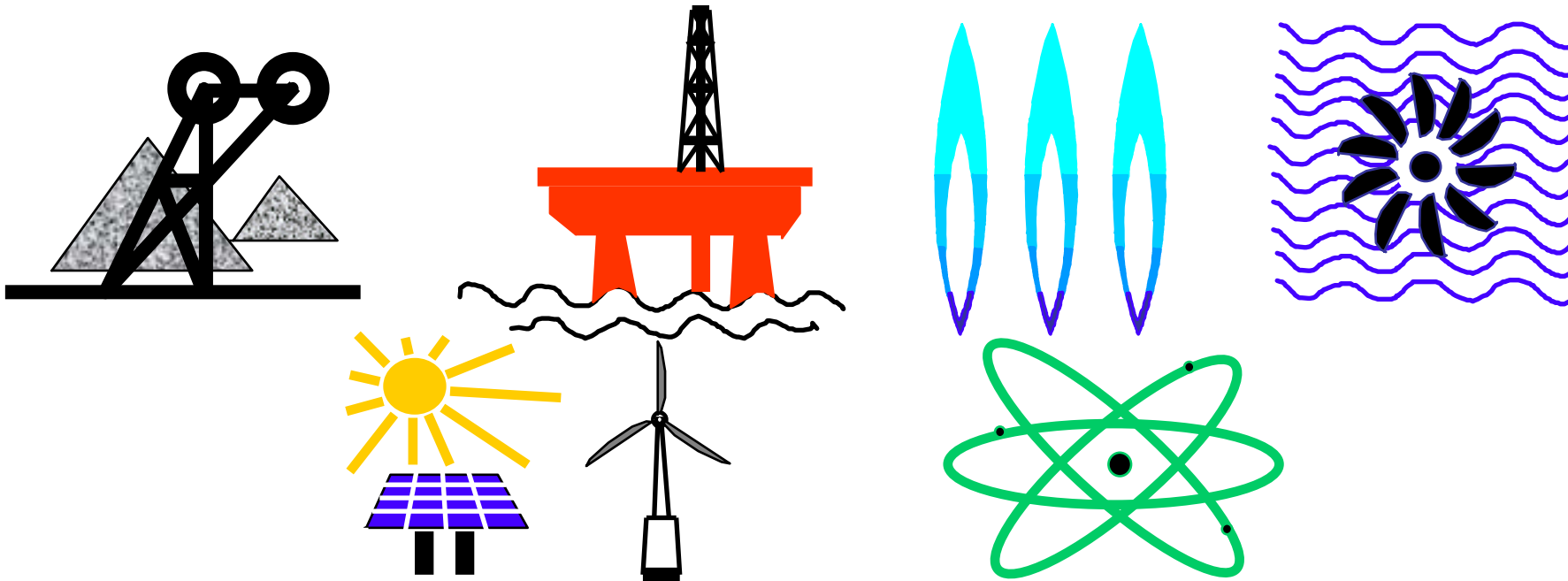
In der ersten Hälfte unseren Jahrhunderts....

~ 10^{10} Menschen

~ 15 Gtöe/Jahr

Man wird ALLES brauchen !

(persönliche Meinung)



VERSCHIEDENES ZUSATZMATERIAL

Pläne Weltweit ...

- **Dans le Monde :**

- On compte aujourd'hui 34 réacteurs nucléaires en construction dans le monde, et presque autant en projet.
- Fort développement en Extrême orient, stagnation (provisoire) aux USA (mais les centrales d'occasion se revendent au prix des neuves, et beaucoup d'entre elles ont obtenu un prolongement de leur durée de vie). La disponibilité des centrales nucléaires s'est spectaculairement améliorée ; ce qui constitue la raison essentielle du renouveau de leur attrait aux États-unis.

- **Zoom sur la situation en Europe :**

- Situation très contrastée : certains pays ont beaucoup de nucléaire (80% de la production électrique française est d'origine nucléaire); d'autres n'en ont pas du tout (Irlande, Autriche, Norvège, Danemark, Italie).
- Certains pays ont décidé de se désengager du nucléaire (Suède, Allemagne) mais ce désengagement ne se traduit pas fortement dans les faits car il est à très long terme; D'autres pays conservent l'option ouverte (Suisse), d'autres encore s'équipent (Finlande).
- A l'Est, certains pays récemment intégrés ont des vieux réacteurs d'origine soviétique, en cours de fermeture ou de remplacement par des réacteurs de conception plus moderne.
- Le réseau de transport d'électricité européen est bien développé, les électrons passent allègrement les frontières. P.ex : la France est exportatrice.
- La politique énergétique en Europe peine à trouver une cohérence !

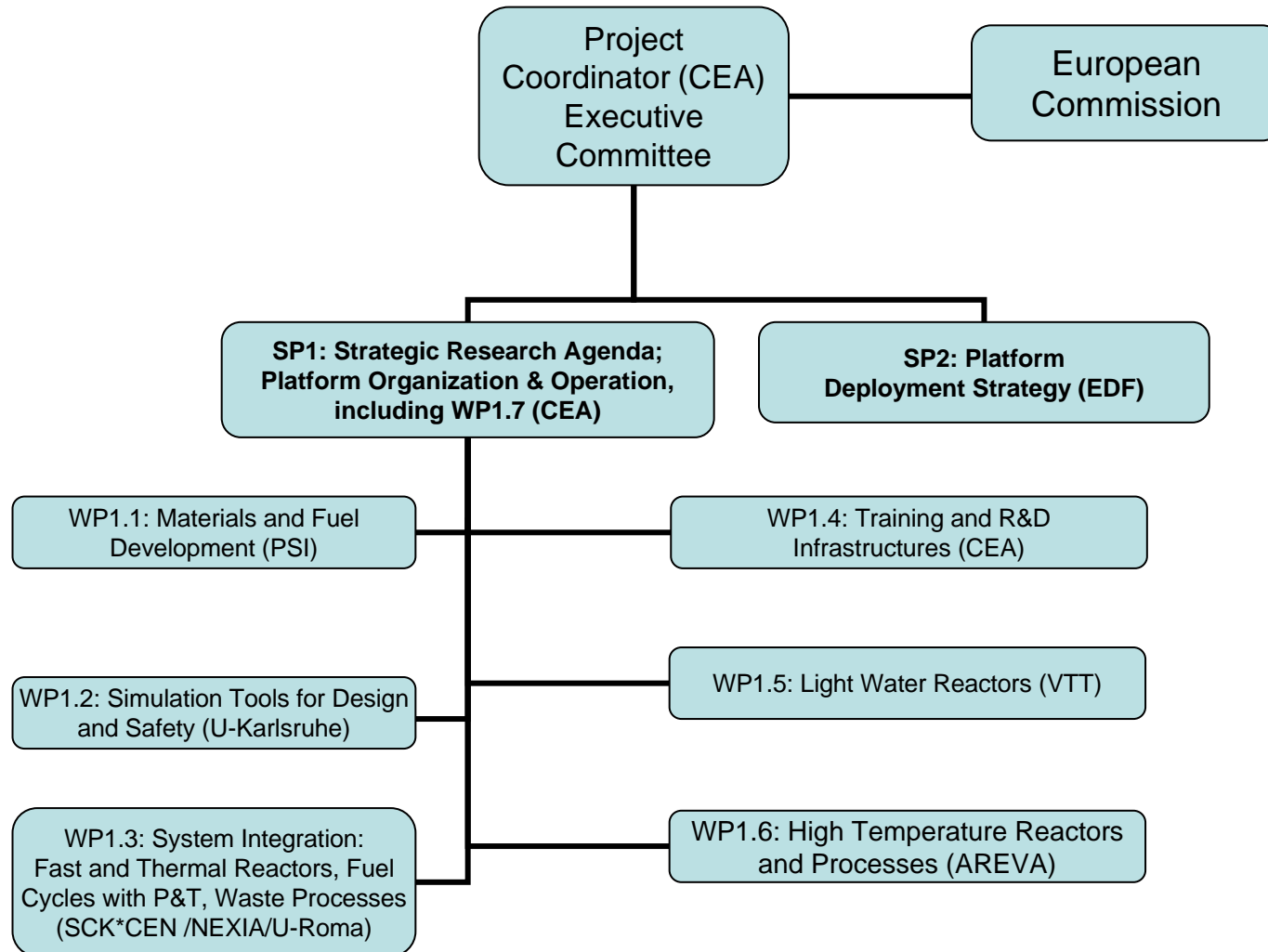
- **Zoom sur la situation de la France :**

- Le cas de la France illustre bien les effets du recours à l'énergie nucléaire.
- Pauvre en ressources propres, la France était très dépendante de l'extérieur pour ses approvisionnements en énergie avant 1973. A la suite du choc pétrolier, la France a totalement modifié la structure de sa production d'énergie électrique. La part de production d'électricité d'origine nucléaire est passée de 8% à 75%, pendant que la production absolue d'énergie passait de 75 à 450 Téra watt heure/an. Son taux d'indépendance énergétique a plus que doublé (20% à 47%) et, parallèlement, la facture d'importation d'énergie pétrolière a vu son poids relatif divisé par plus de trois. Le kWh d'électricité est la moins cher d'Europe, la fiabilité des réacteurs est bonne, et aucun accident grave avec rejet radioactif n'a eu lieu à ce jour sur le parc des 58 réacteurs français, qui représente 13% de l'ensemble des réacteurs produisant de l'électricité dans le monde.

Konzepte für Aufwertung der Nuklearen Wärme...

- Cette figure illustre simplement la formule de Carnot, qui donne le rendement thermodynamique d'une machine thermique en fonction des températures des sources froide et chaude qu'elle utilise. L'énergie thermique est beaucoup mieux convertie si elle est produite à haute température.
- Avec un REP : on rejette 2GWth pour produire 1 GWé
- Avec un VHTR : on rejetterait 1GWth seulement pour produire la même puissance électrique. Mais ce type de réacteur permet en plus de faire de la cogénération d'hydrogène et de chaleur industrielle, ce qui peut porter le rendement de conversion aux environs de 70%.

EURATOM - FP6/7: Sustainable Nuclear Fission Technology Platform



Primary Goals for Sustainable Nuclear Energy

Sustainability–1

- *provide sustainable energy generation that meets clean air objectives and promotes long-term availability of systems and effective fuel utilization for worldwide energy production.*

Sustainability–2

- *minimize and manage their nuclear waste and notably reduce the long term stewardship burden in the future, thereby improving protection for the public health and the environment.*

Economics–1

- *clear life-cycle cost advantage over other energy sources.*

Economics–2

- *financial risk comparable to other energy projects.*

Safety and Reliability–1

- *exceptional safety and reliability.*

Safety and Reliability–2

- *very low likelihood and degree of reactor core damage.*

Safety and Reliability–3

- *eliminate the need for offsite emergency response.*

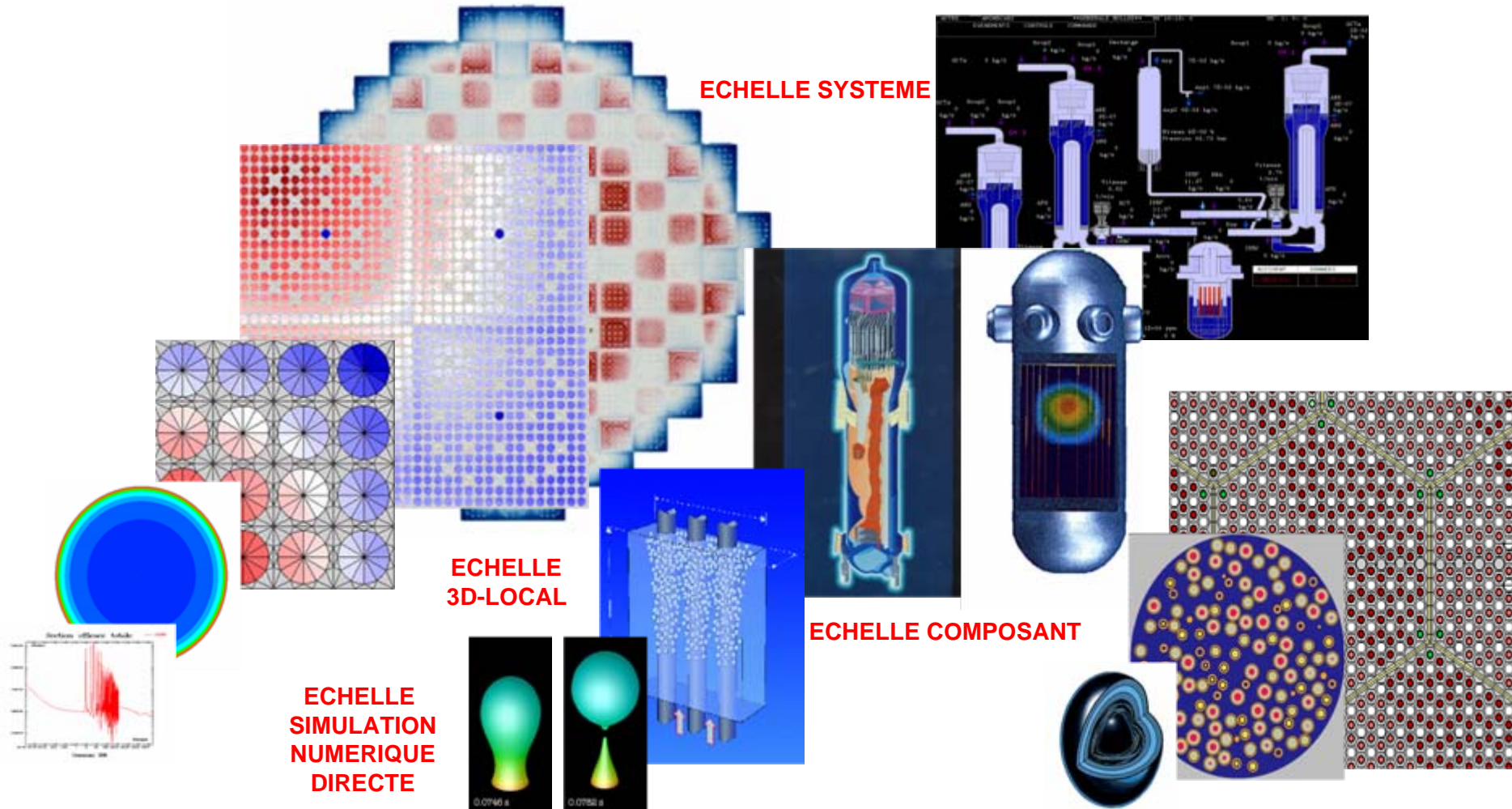
Proliferation Resistance and Physical protection

- *increase the assurance that they are a very unattractive and least desirable route for diversion or theft of weapons-usable materials and provide increased physical protection against acts of terrorism.*

Prolifération-Terrorisme

- On ne désinventera pas la fission! Les risques de prolifération et de terrorisme existent même indépendamment du nucléaire civil.
- On pourrait faire une (mauvaise) bombe avec du Pu civil (difficile à détourner, contrôles internationaux). Les réacteurs Gen IV rendront cette voie très difficile.
- Il n'est pas très difficile de produire secrètement de l'uranium enrichi par UCG (25 kg pour une bombe).
- Inde, Pakistan, Chine, Corée du Nord, Iran : les garde-fous anti-prolifération ont largement échoué.
- Armes nucléaires miniaturisées, guidées : des perspectives réelles d'utilisation. La bombe atomique n'est plus seulement une arme de dissuasion.
- 11/9 : le nucléaire est vulnérable aux attaques terroristes. Le renforcement de la résistance des installations est en cours.
- Bombes sales : l'impact radiologique serait minime, mais quid de l'impact psychologique?
- Il existe bien d'autres menaces (biologique, chimique) probablement aussi grandes, même si elles n'ont pas été mises en œuvre à grande échelle...

Des modélisations multi-échelles, multi-domaines Des plate-formes en co-développement

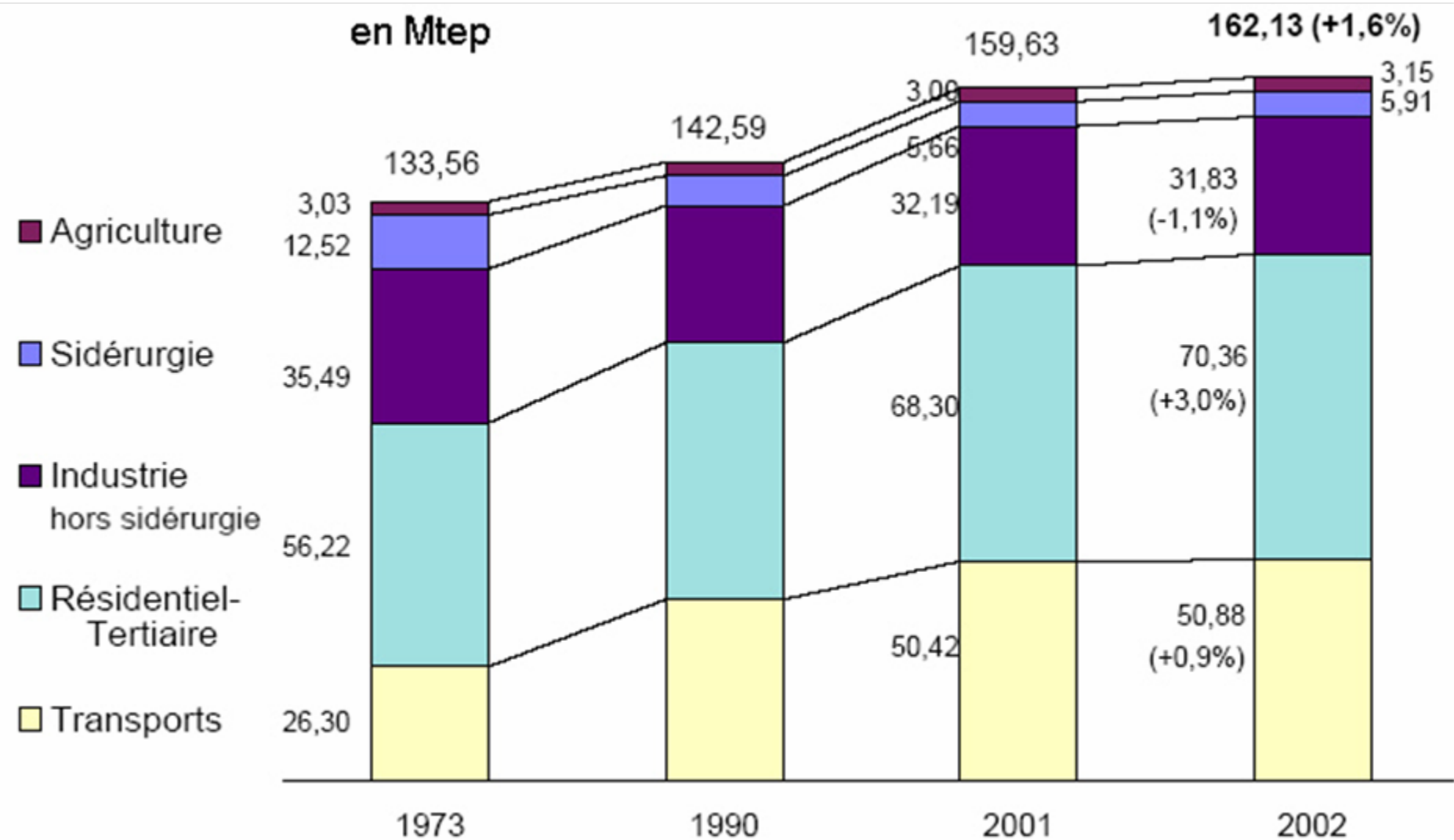


Production annuelle du parc français (58 réacteurs)

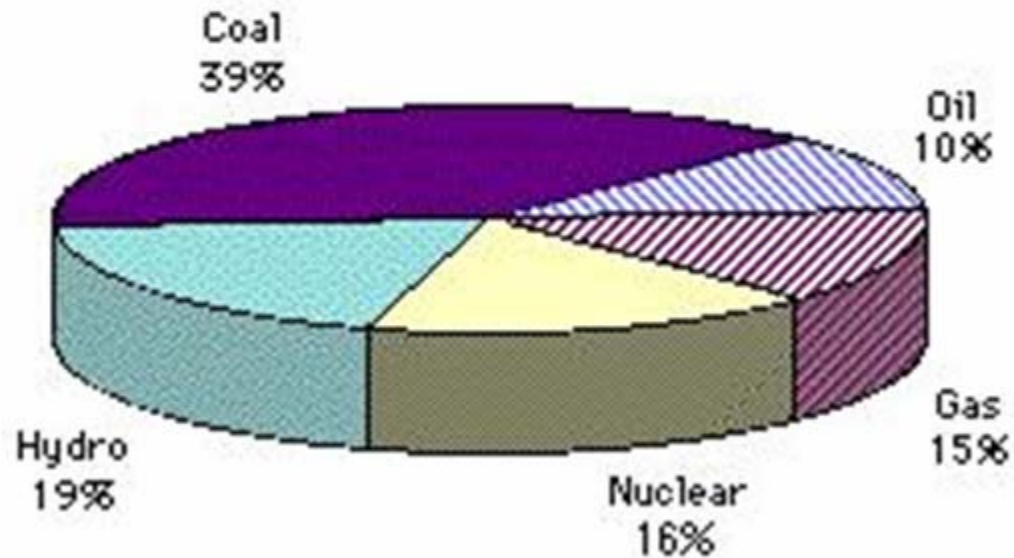
	Poids	Poids
	(t/an)	(t/an)
U	1143	
Pu	11.8	
AM	0.94	
PF	44.4	
	<i>dont PFVL</i>	3.93
	<i>Cs 135</i>	1.57
	<i>Tc 99</i>	0.98
	<i>Zr 93</i>	0.89
	<i>Pd 107</i>	0.24
	<i>I 129</i>	0.20
	<i>Sn 126</i>	0.02
	<i>Se 79</i>	0.01
	<i>C 14</i>	0.00



Utilisation de l'énergie



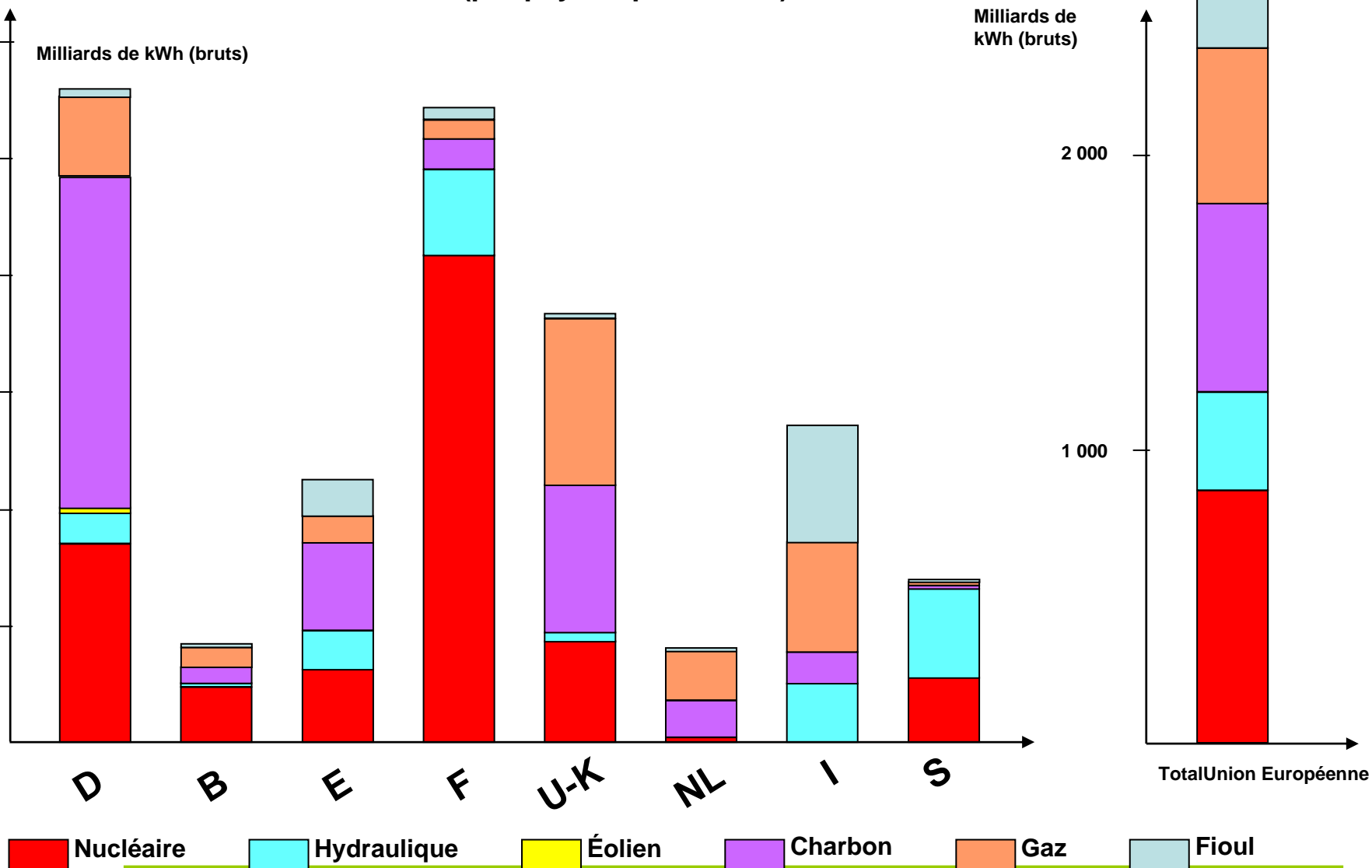
World Electricity Generation





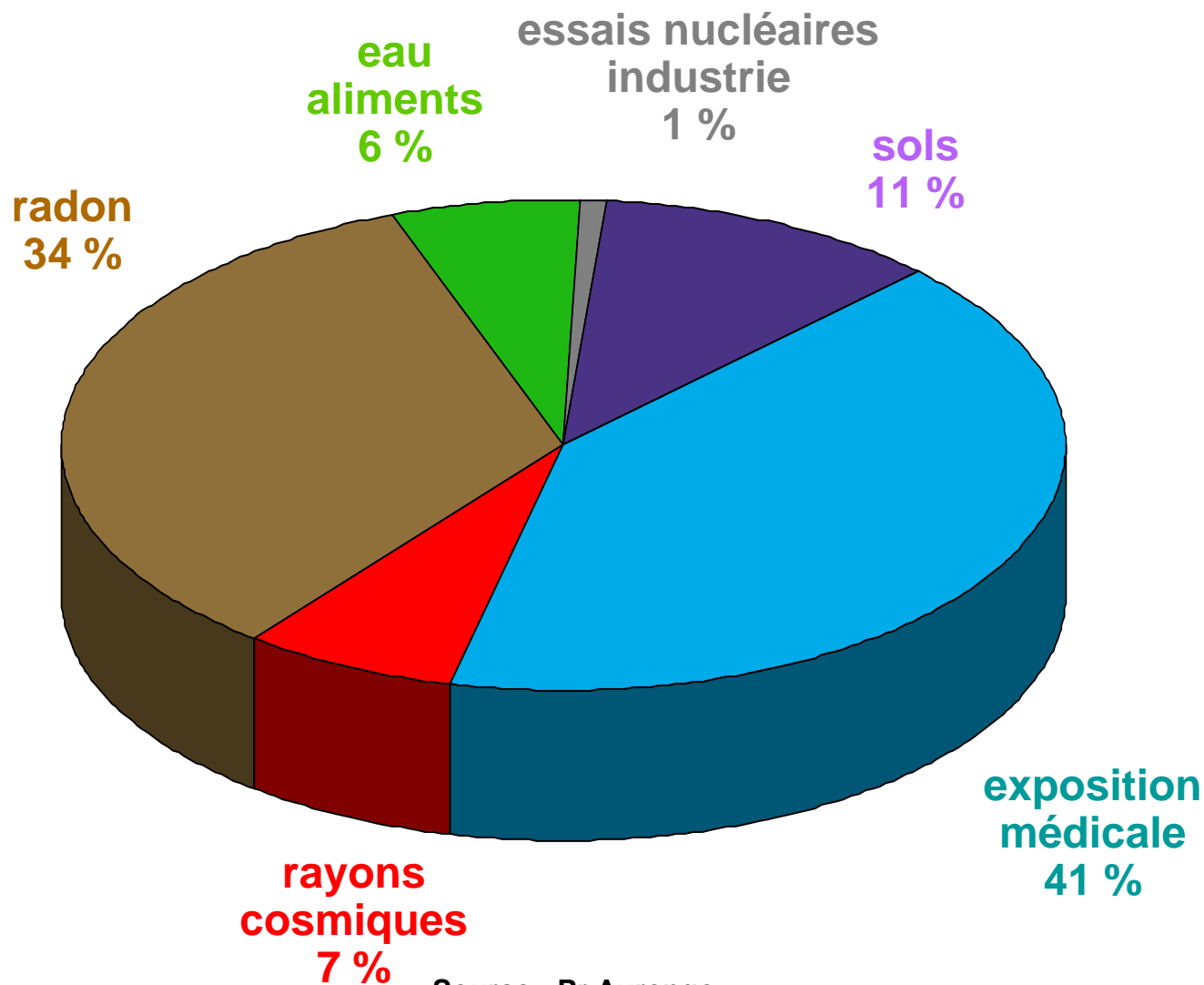
12-33 Production d'électricité en Europe (en 2000)

(par pays et par source)





Irradiation naturelle et médicale



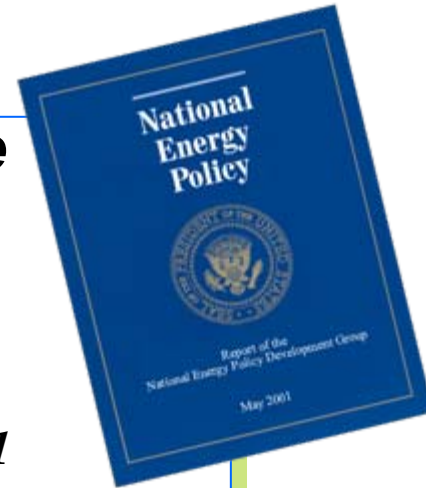
2003

Source : Pr Aurengo

Nucléaire : le redémarrage?

USA : ***“The NEPD Group recommends that the President support the expansion of nuclear energy in the United States as a major component of our national energy policy.”***

Report of the National Energy Policy Development Group, May 2001



Europe « ... nécessité de maintenir le nucléaire en Europe »

European Parliament resolution, Novembre 2001

... ponctué par des initiatives récentes

- 2000 : Initiative Generation IV
décision de 10 pays d'élaborer une “technology roadmap” pour guider la R&D sur les systèmes du futur sous la supervision du DOE/NERAC → 2002 : “*Technology Roadmap for GenIV N.E.S.*”
- 2002 : Initiative Nuclear Power 2010 (relance du nucléaire sur le court terme, et incontournable pour assurer le long terme)
- 2003 : Initiative AFCI (*Advanced Fuel cycle Initiative*) en continuité du programme AAA (*Advanced Accelerator Applications*) :
 - court terme / problématique Yucca Mountain
 - long terme / en cohérence avec Generation IV
- 2003 : Initiative NHI (*Nuclear Hydrogen Initiative*) :
 - Complète le programme “Freedom car”
 - Reconnaît l'intérêt du VHTR pour la production de H2

Réacteur rapide sodium (*Sodium Fast Reactor SFR*)

Jalons :

2009 - Dossier de faisabilité du SFR

2015 - Confirmation des performances du SFR

- Décision sur un retour éventuel à une phase de développement technologique (*combustible et matériaux*)
- Décision sur la construction en France ou la participation à la construction d'un démonstrateur prototype

Moyens financiers d'ici 2015 :

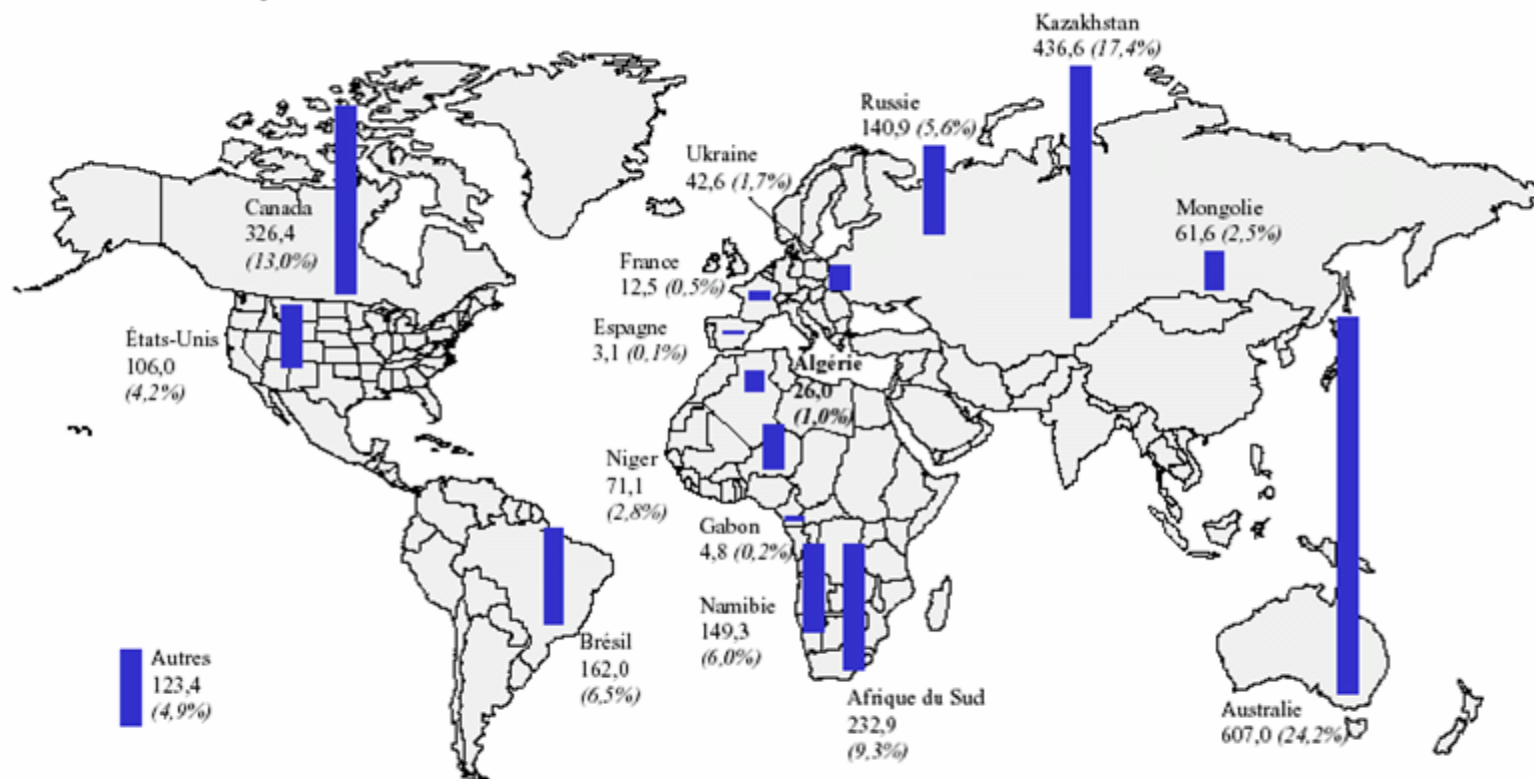
30 % de la subvention pour les Systèmes du Futur (~9 M€ en 2005) + participations des industriels et aides incitatives.

Collaborations :

- Russie, Chine + Forum Génération IV (*Japon, Etats-Unis, Corée du Sud...*)
- Possibilités d'irradiations aux neutrons rapides dans Joyo et Monju (Japon), ou Bor-60 et BN-600 (Russie) après l'arrêt de Phénix (2009)
→ Réexamen d'une solution nationale si nécessaire

Réserves mondiales prouvées d 'uranium* (1. 1. 1999)

Unité : Milliard de tep



Total monde : 2 506,2 milliers de tonnes (hors Chili et Chine)

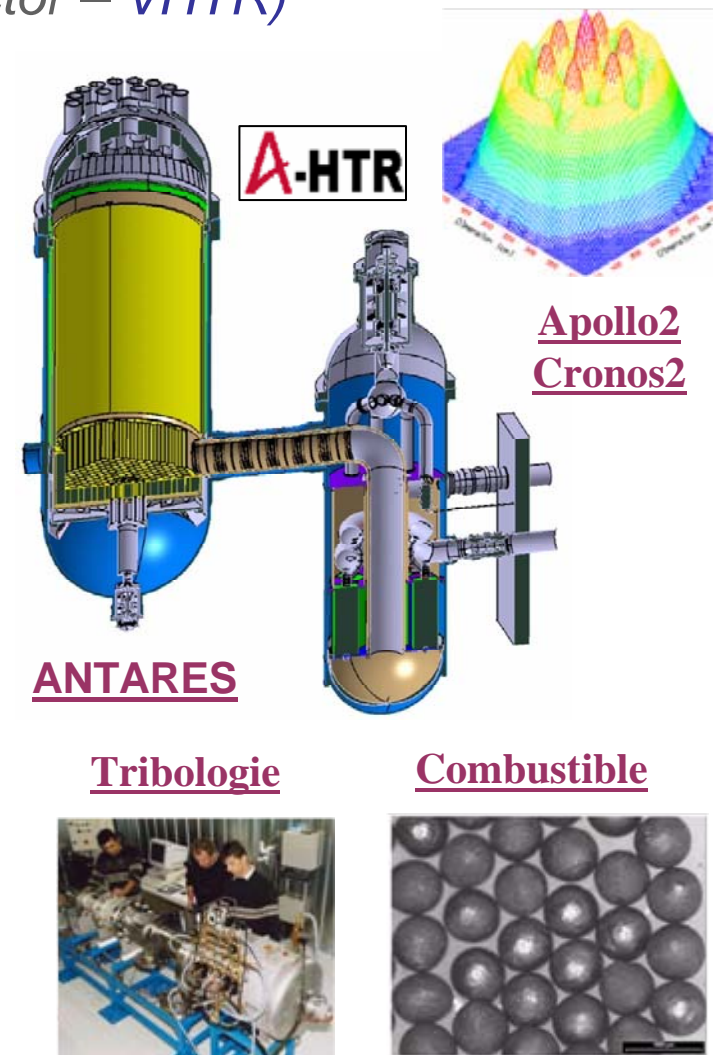
(*) ressources raisonnablement assurées récupérables à moins de 80\$/kg U

Source : Observatoire de l'énergie d'après CEA/DSE et AIE/OCDE

Attention, ne comprend pas tout

Production d'hydrogène et Réacteur à très haute température (*Very High Temperature Reactor – VHTR*)

- **Système de calcul**
- **Combustible à particule**
- **Matériaux résistants à très haute température ($> 950^{\circ}\text{C}$)**
- **Technologie des circuits hélium à haute température**
- **Procédés de production hydrogène**
- **Système de conversion**



→ 2009 : Faisabilité → 2015 : Performance → 2017 : NGNP 1er démonstrateur

La stratégie des systèmes nucléaires du futur

1 – Un nucléaire de 4e génération pour un développement énergétique durable

- Recyclage intégral du combustible et résistance à la prolifération
- Production d'hydrogène pour les transports, dessalement...

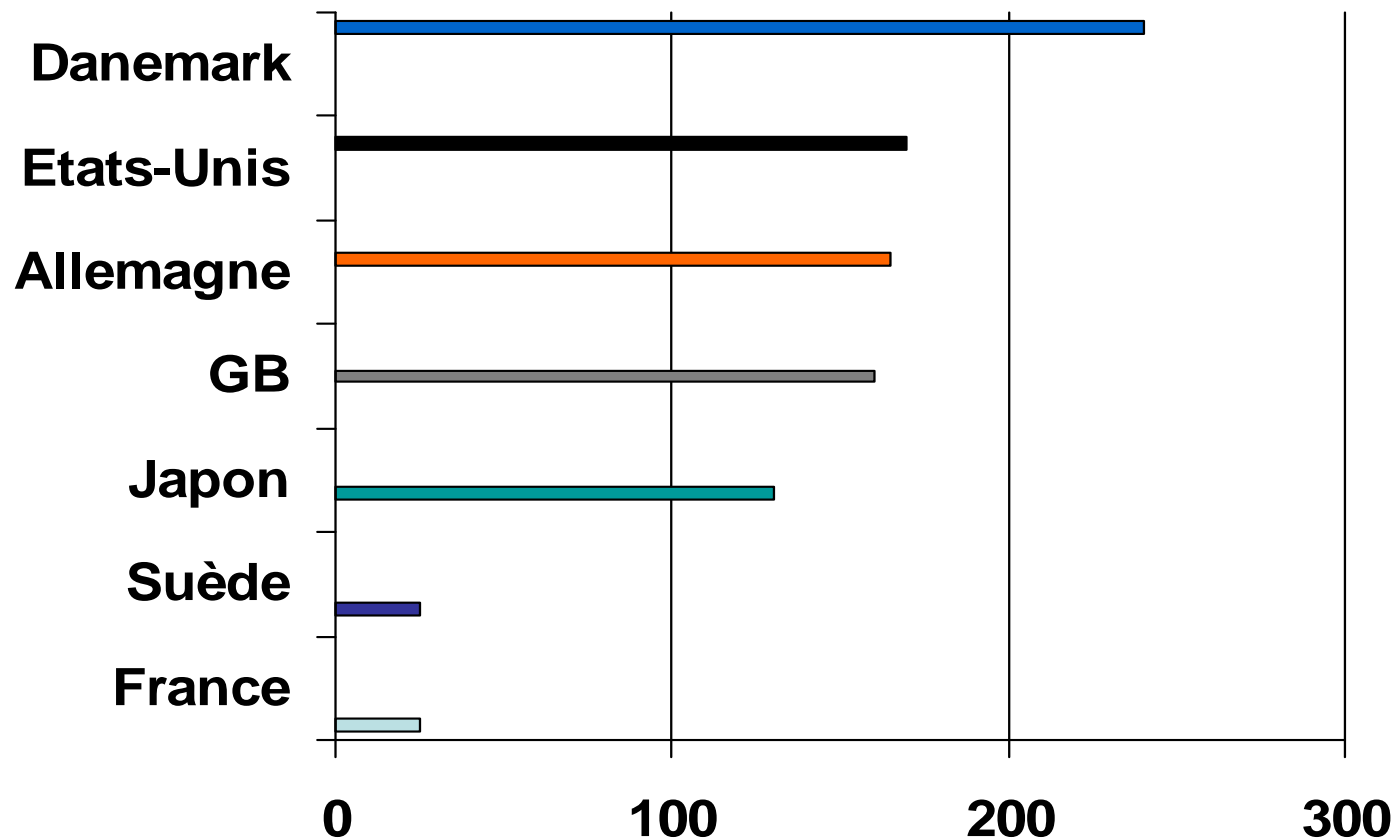
2 – Le Forum Generation IV : un cadre international pour développer les technologies clés d'un nucléaire durable

- Une gamme de systèmes à caloporteur gaz → HTR/VHTR, GFR & Production nucléaire d'hydrogène
- Une nouvelle génération de réacteurs rapides à sodium → SFR
- Nouveaux procédés du cycle pour une gestion globale des actinides

3 – Intégrer l'effort de R&D français (*CEA + partenaires de la recherche et de l'industrie*) dans la coopération internationale du Forum Generation IV et du 7^e PCRD



12-23 **Le choix des énergies : rejets de CO₂ par kWh dans le monde (gC/kWh)**



2004



Quelques caractéristiques de l'économie du nucléaire

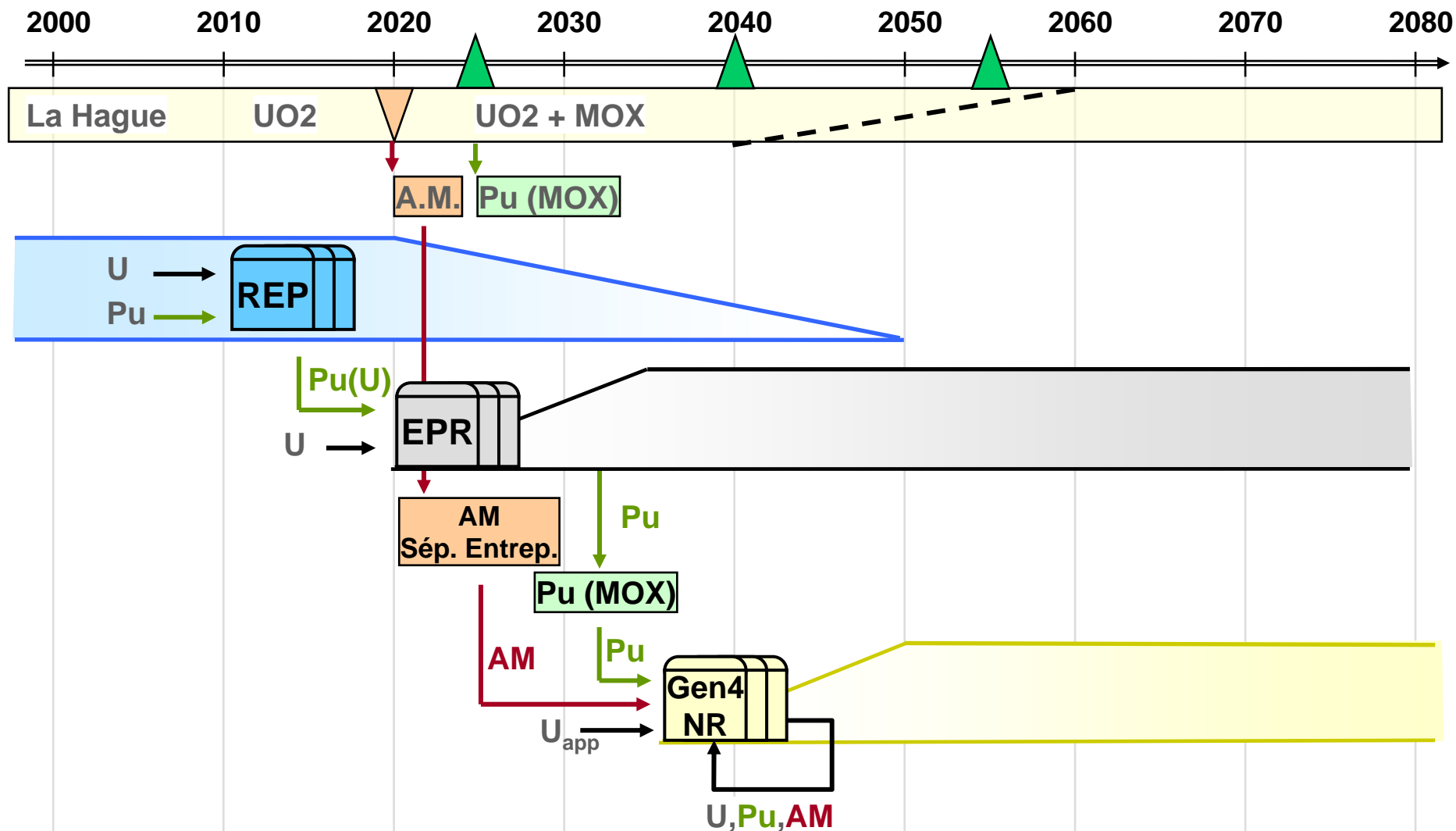
- Les investissements nucléaires sont très lourds.
- Les temps de retour sur investissement sont très longs.
- La rentabilité du nucléaire dépend beaucoup du taux d'actualisation.
- Le prix du kWh nucléaire est très stable.
- Le prix des matières premières a peu d'influence. Les ressources en uranium sont bien réparties.
- La compétitivité du nucléaire est en hausse par rapport aux hydrocarbures, dont le prix augmente(ra).
- Tous les coûts sont pris en compte, y compris les provisions prévues pour le démantèlement et la gestion des déchets.
- Les externalités sont très basses.
- Les emplois sont localisés.
- Les dépenses sont effectuées sur le territoire national.
- Il y a possibilité d'exporter électricité et technologie.
- Retraiter ou non? Ce n'est pas seulement un problème économique.

Progrès sur le combustible

- Les enjeux du domaine « combustible » :
 - diminuer le nombre d'assemblages
 - allonger les campagnes
 - disposer d'un parc plus souple et plus réactif
 - adapter les flux de traitement-recyclage
 - tendre vers une dosimétrie zéro et minimiser l'impact sur l'environnement
- Ils conduisent à
 - accroître les taux de combustion
 - faire progresser les capacités des MOX
 - rechercher un fonctionnement sans limitation due à l'IPG
 - Tout en poursuivant des progrès en fiabilité, robustesse, flexibilité et sûreté/environnement
- Les solutions techniques sont fondées sur
 - l'utilisation de l'alliage M5 (gaine et structure)
 - l'utilisation des meilleurs composants (AFA 3GL, AFA 3GX, HTPLX)
 - la mise au point de pastilles remède IPG
 - l'amélioration de la microstructure des céramiques MOX

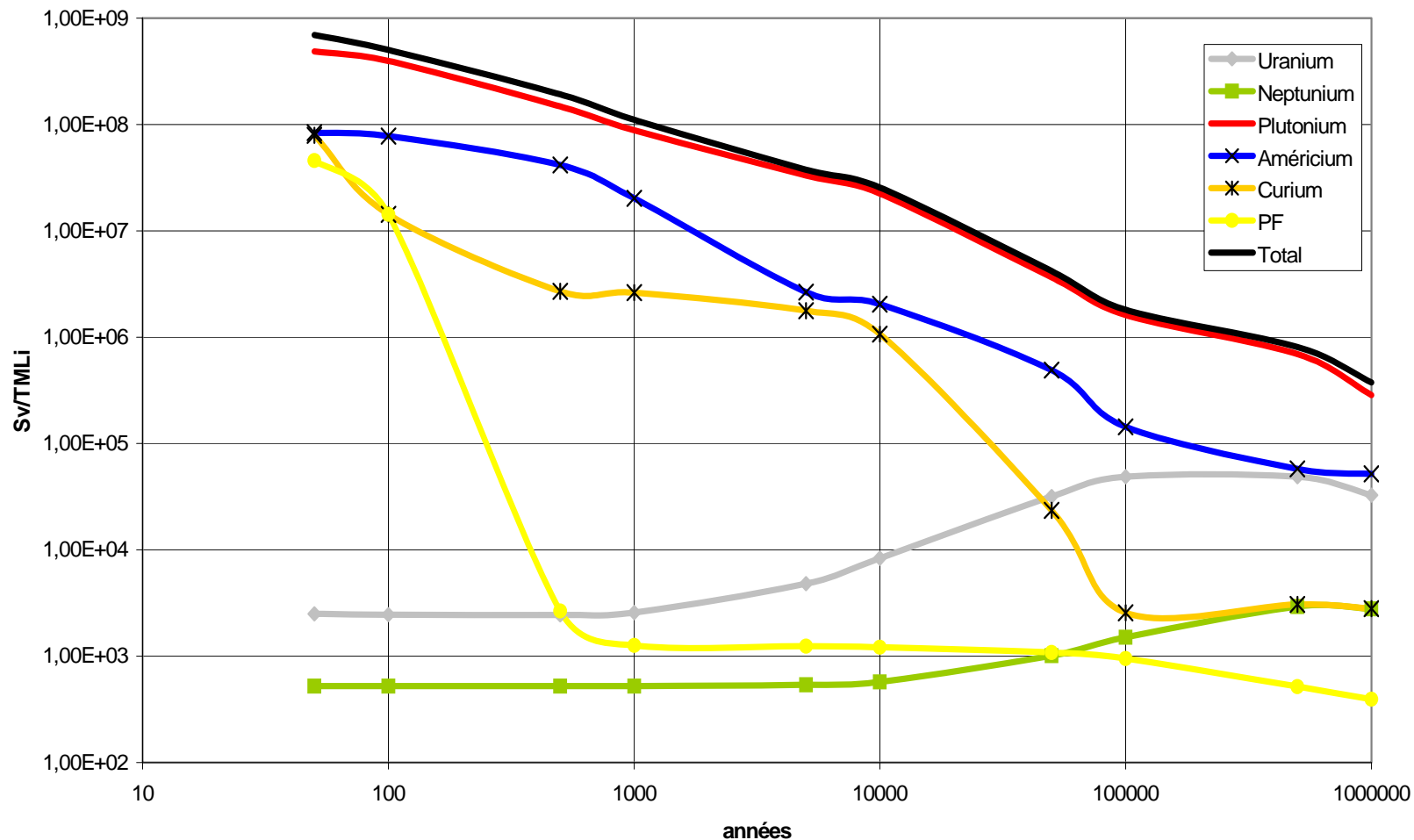


Scénario de gestion globale des actinides avec un déploiement vers 2035 de systèmes Gen IV à neutrons rapides



L'évolution dans la durée de la radiotoxicité

Radiotoxicité Ingestion ($t_0 = 5$ ans) MOX 55 GWj/t





Séparation-transmutation : les enjeux

- Idée générale : séparer les radionucléides transmutables des autres, séparer les radionucléides à vie longue des autres, pour gérer ces différentes catégories de déchets de façon optimisée.
- Bonnes perspectives de transmuter les actinides dans les RNR. Ce qu'on gagnerait : un facteur important sur la radiotoxicité des déchets et sur la chaleur qu'ils dégagent (facteur dimensionnant d'un stockage profond).
- Avant de les transmuter, encore faut-il pouvoir les séparer et les entreposer.

Conclusions

- L'énergie fournie par fission nucléaire est importante (10^5 à 10^6 fois l'énergie chimique par atome) mais requiert l'utilisation de ^{235}U (seul isotope naturel fissile - [Ressources](#))
- Les réacteurs nucléaires ont une taille unitaire importante ([masse critique](#) pour atteindre la divergence) induisant un investissement important (1500 €/kW soit 2G€/réacteur - [Economie](#))
- Un réacteur génère des produits de fission et des actinides dont certains sont radioactifs et à durée de vie longue ([Déchets](#))
- Les réacteurs à neutrons thermiques nécessitent l'utilisation d'un [modérateur](#). La grande majorité (87%) des réacteurs en fonctionnement utilisent la filière REP, Uenrichi refroidi à l'eau)

-
- L'énergie est récupérée sous forme de chaleur à travers un caloporteur et un système secondaire de conversion pour produire de l'électricité (rendement thermodynamique)
 - Le nucléaire fournit 6% des besoins énergétiques mondiaux (2500TWhe)
 - La nouvelle génération III est une évolution naturelle de la génération actuelle incluant quelques améliorations notables notamment sur la sûreté.
 - Les réacteurs du futur doivent répondre à des critères sélectifs en termes de sûreté, ressources énergétiques, économiques, traitement des déchets, non-prolifération et modularité.
 - Les réacteurs de Génération IV devraient permettre de positionner la fission nucléaire comme une énergie durable ne contribuant pas à l'émission de gaz à effet de serre

-
- **Le XXème siècle nous a légué un double défi dans le domaine de l'énergie :**

- Faire face aux besoins en énergie d'une population mondiale multipliée par 10 entre 1750 et 2050,
- consommant 10 fois plus par habitant $\Rightarrow \times 100$

- > Maîtriser les pollutions locales, régionales et planétaires (climat)

- **Il nous en a laissé les moyens, mais la mobilisation devra être totale pour relever ces défis**

- **Bien que l'augmentation des besoins et l'aggravation des risques proviennent des pays pauvres, les pays riches peuvent et doivent apporter leur contribution : maîtrise de l'énergie, transferts de technologie, réduction de leurs rejets de GES.**

- **Les voies à court et moyen terme :**

- Les économies d'énergie
- Le remplacement du charbon par le gaz naturel
- Le développement du nucléaire
- Les énergies renouvelables

- **Une approche mondiale et européenne car les ressources et les effets sur l'environnement sont mondiaux**

- **Mais sans perdre de vue que les réponses ne sont pas forcément les mêmes dans tous les pays (*priorités selon l'état de développement, ressources domestiques, capacités financières, contexte culturel, ...*)**