

JIREC 2008 - AMBLETEUSE, le 15 mai 2008

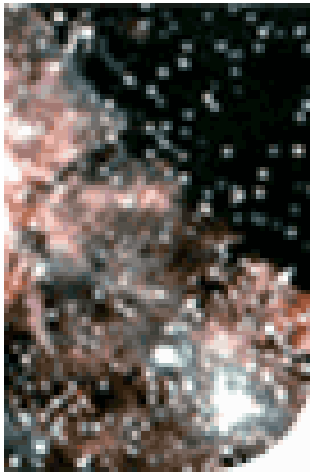


LE CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE

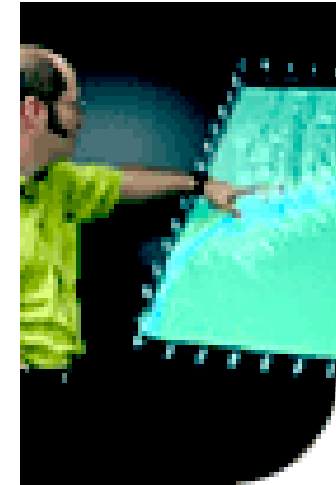
Bernard BOULLIS
CEA

CEA : LES GRANDS CHAMPS DE RECHERCHE

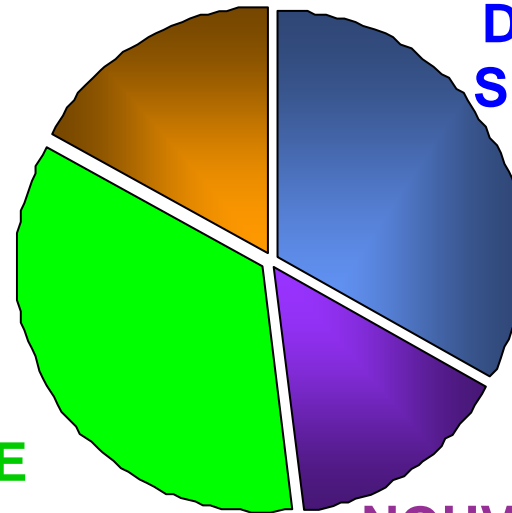
cea



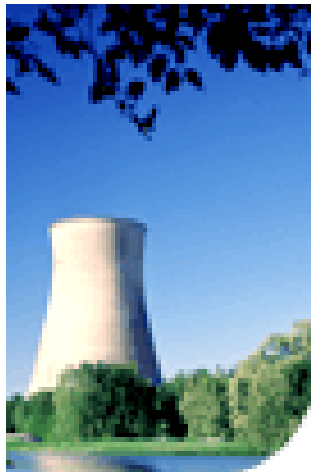
**RECHERCHE
FONDAMENTALE**



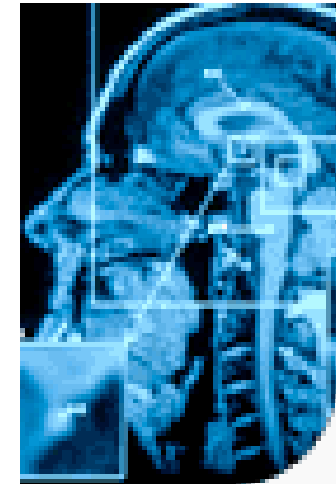
**DEFENSE
SECURITE**



ENERGIE



**NOUVELLES
TECHNOLOGIES
Santé/ Information**





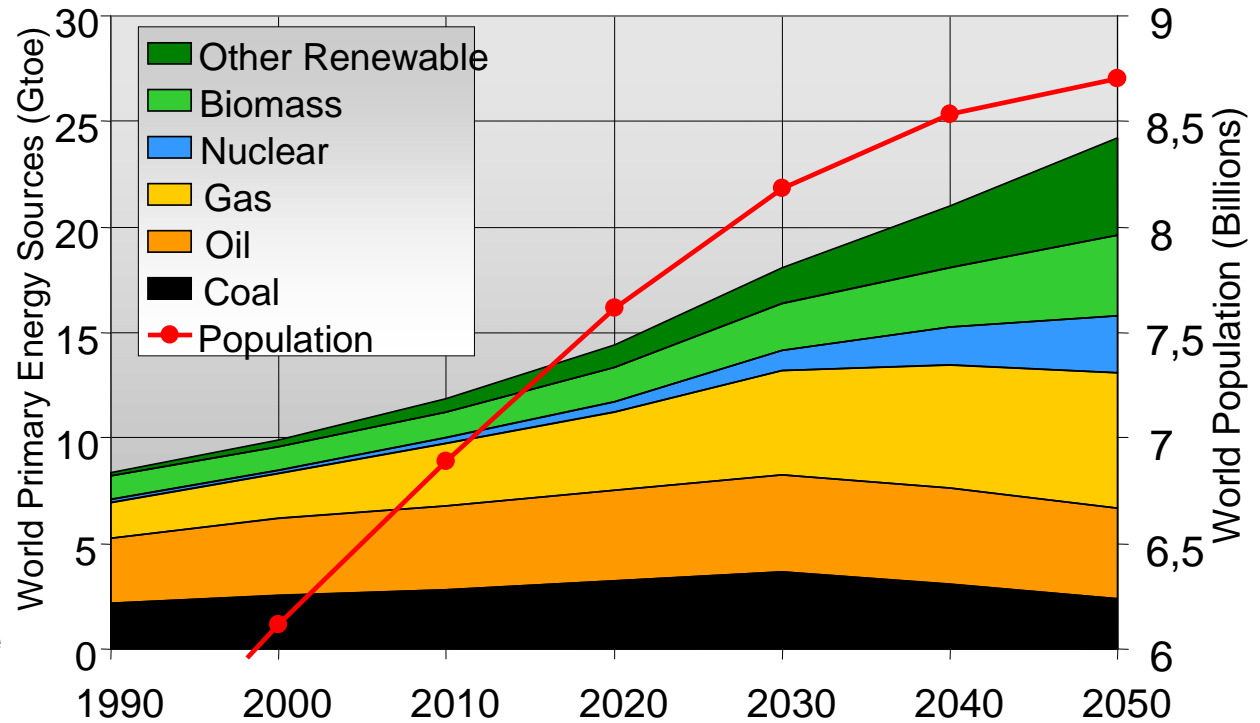
10 Gtep pour 6 milliards habitants ...

(from NASA)

Un scénario pour le futur...



Source IEA : Energy to 2050 -
Scenarios for a Sustainable Future



Quelles voies pour les prochaines décennies?

-économiser

-diversifier (renouvelable, nucléaire ?)

- ...

L'énergie nucléaire en 2000



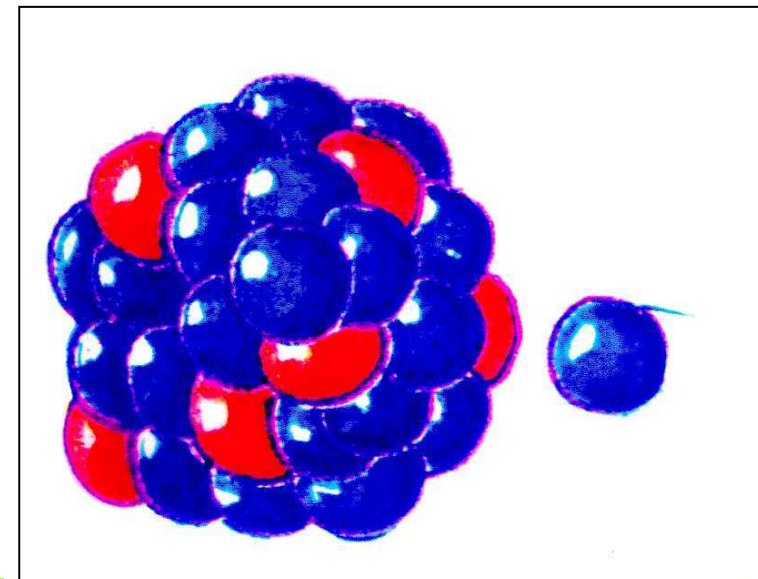
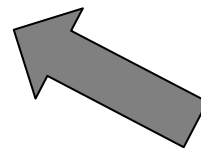
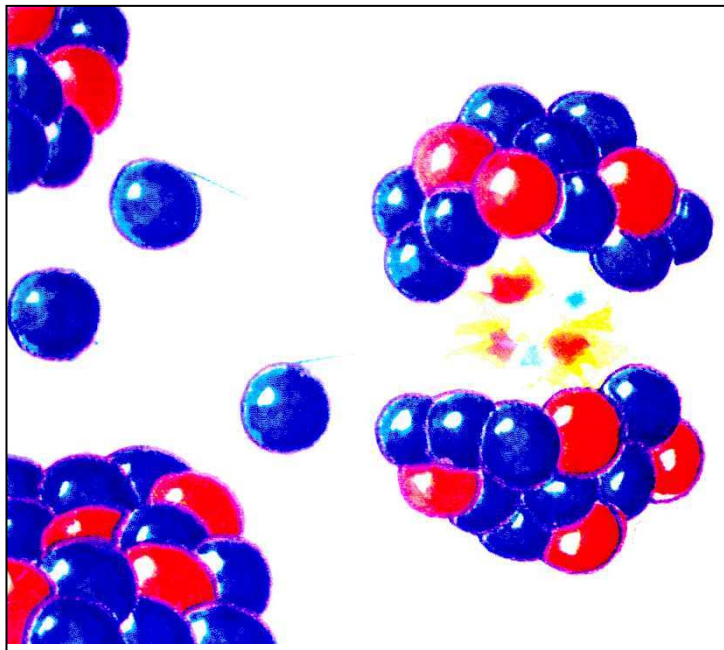
- **7 % de l'énergie primaire dans le MONDE**
- **17 % de la production électrique dans le MONDE**
(430 réacteurs, 2500 TWh/an)
- **30 % de la production électrique en EUROPE**
(142 réacteurs)
 - **80 % en France** (60 réacteurs)
 - **58 % en Belgique** (7 réacteurs)
 - **58 % en Suisse** (5 réacteurs)
 - **30 % en Allemagne** (18 réacteurs)
 - **28 % en Espagne** (9 réacteurs)
 - **en Suède** (11 réacteurs)
 - **0 % en Italie**
Danemark
Autriche

Quelques repères historiques...



1938 : HAHN met en évidence le phénomène de fission

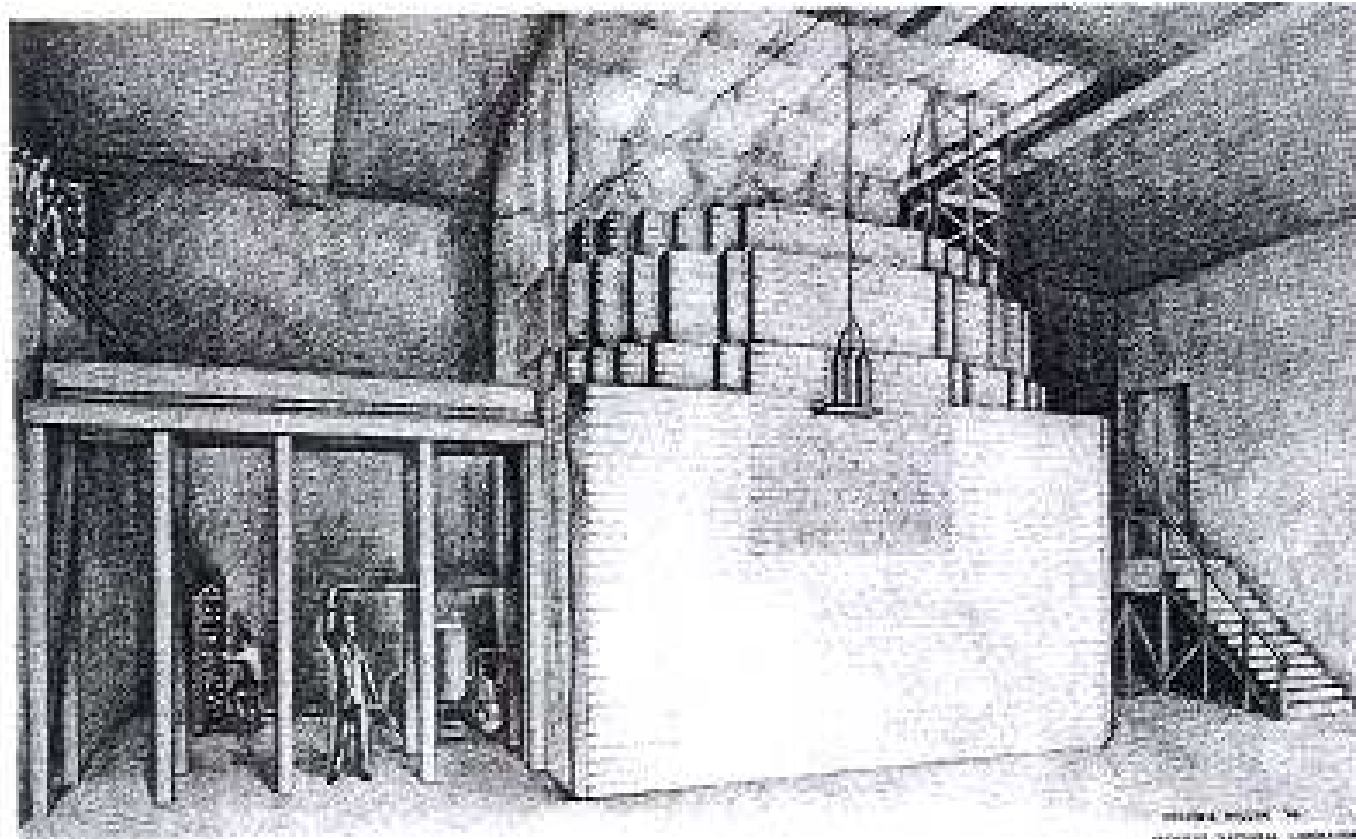
1939 : JOLIOT dépose un brevet pour un « dispositif de production d'énergie »



Quelques repères historiques...



- **1938 : HAHN met en évidence le phénomène de fission**
- **1939 : JOLIOT dépose un brevet pour un « dispositif de production d'énergie »**
- **1942 : la « pile de FERMI »**



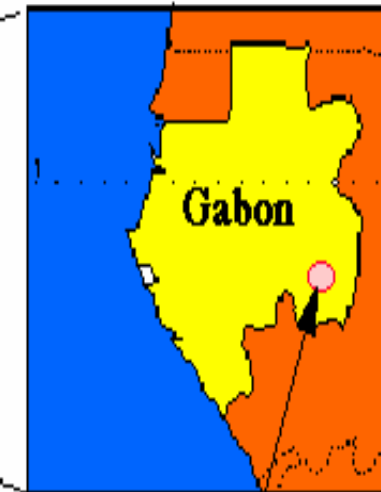
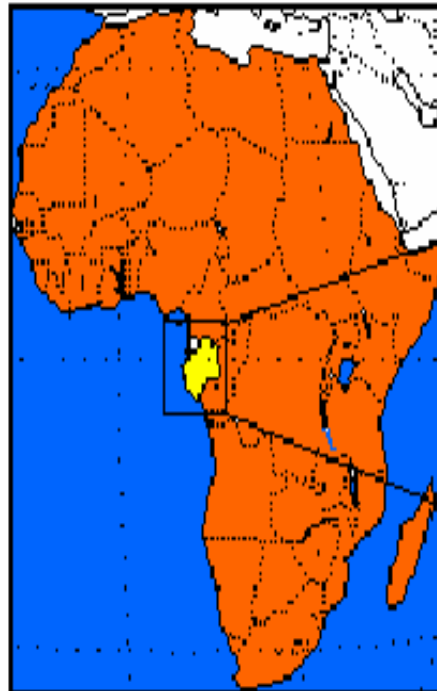
Le premier réacteur nucléaire



Le premier réacteur nucléaire était naturel:

Oklo, il y a **2 milliards d'années**,

et pendant **plusieurs centaines de milliers d'années.**



Oklo Site (Franceville)



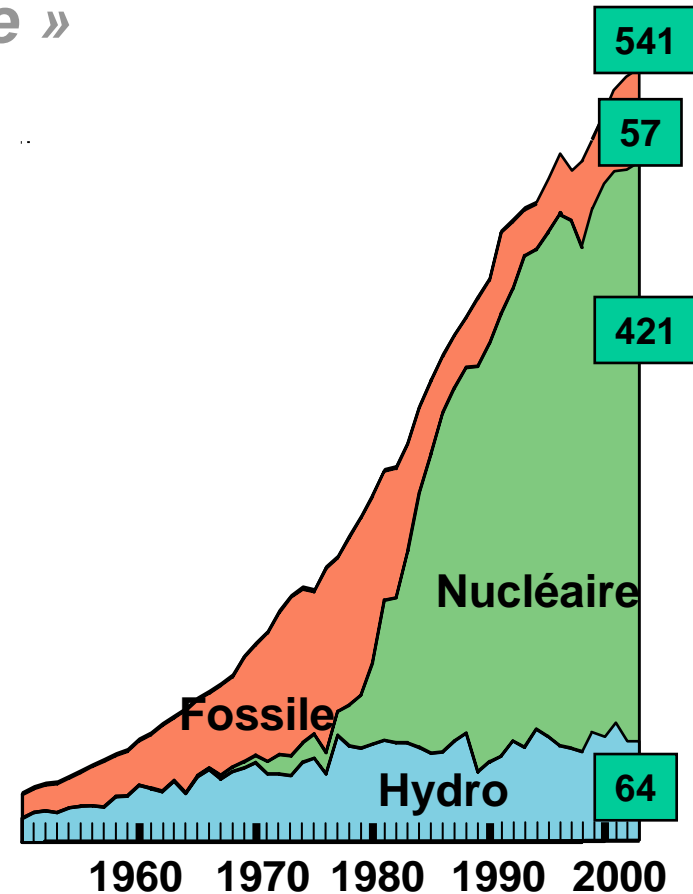
Quelques repères historiques...



1938 : HAHN met en évidence le phénomène de fission

1939 : JOLIOT dépose un brevet pour un « dispositif de production d'énergie »

- 1942 : la « pile de FERMI »
- 1948 : ZOE (fort de Chatillon)
- 1956 : G1 à MARCOULE
- 1977 : CHOOZ (REP)
- 1999 : CIVAUX-2 (58^{ème} REP)



Quelques repères historiques...



- **1938 : HAHN met en évidence le phénomène de fission**
- **1939 : JOLIOT dépose un brevet pour un « dispositif de production d'énergie »**
- **1942 : la « pile de FERMI »**
- **1948 : ZOE (fort de Chatillon)**
- **1945 : HIROSHIMA et NAGASAKI**
- **1956 : G1 à MARCOULE**
- **1970 : CHOOZ (REP)**
- **1999 : CIVAUX-2 (58^{ème} REP)**

Quelques repères historiques...



- **1938** : HAHN met en évidence le phénomène de fission
- **1939** : JOLIOT dépose un brevet pour un « dispositif de production d'énergie »
- **1942** : la « pile de FERMI »
- **1948** : ZOE (fort de Chatillon)
- **1945** : **HIROSHIMA** et **NAGASAKI**
- **1956** : G1 à MARCOULE
- **1970** : CHOOZ (REP)
- **1986** : **TCHERNOBYL**
- **1999** : CIVAUX-2 (58^{ème} REP)



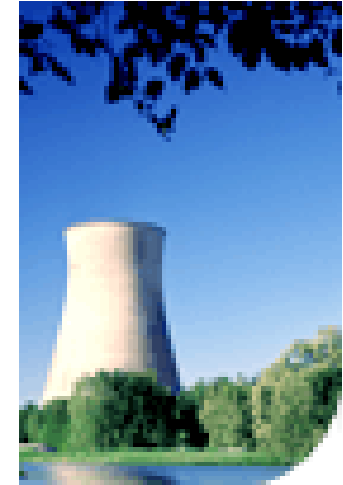
La centrale de Tchernobyl compte quatre réacteurs.
Le 26 avril 1986, le réacteur n° 4 explose.

L'ENERGIE NUCLEAIRE ...



ATOUTS :

- densité énergétique
- pas de CO₂
- coût stable
- ressources : millénaires avec concepts avancés ?



MAIS : *des matières dangereuses*

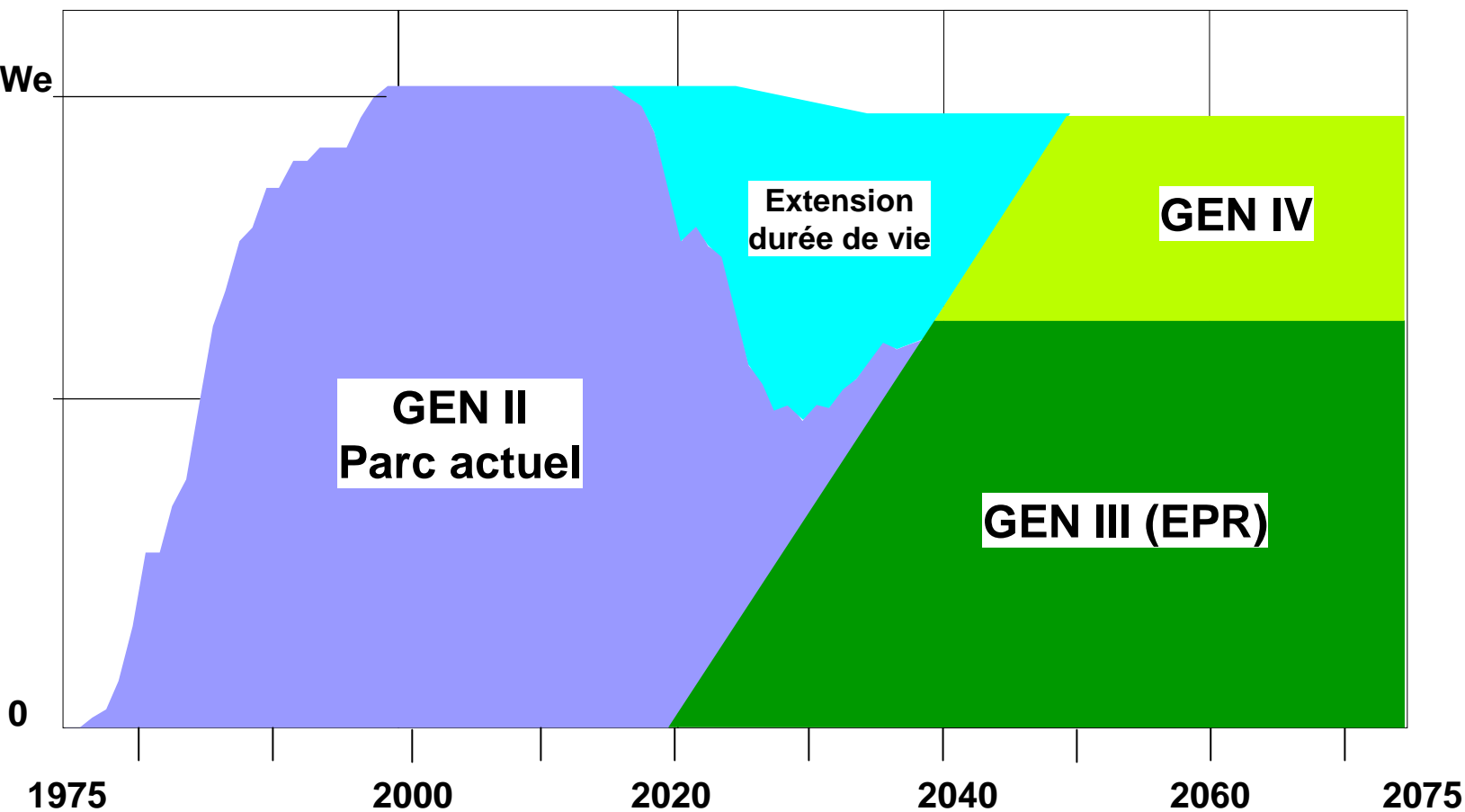
- sûreté des réacteurs
- risque de prolifération
- les déchets nucléaires

ENERGIE NUCLEAIRE : LE CAS FRANCAIS

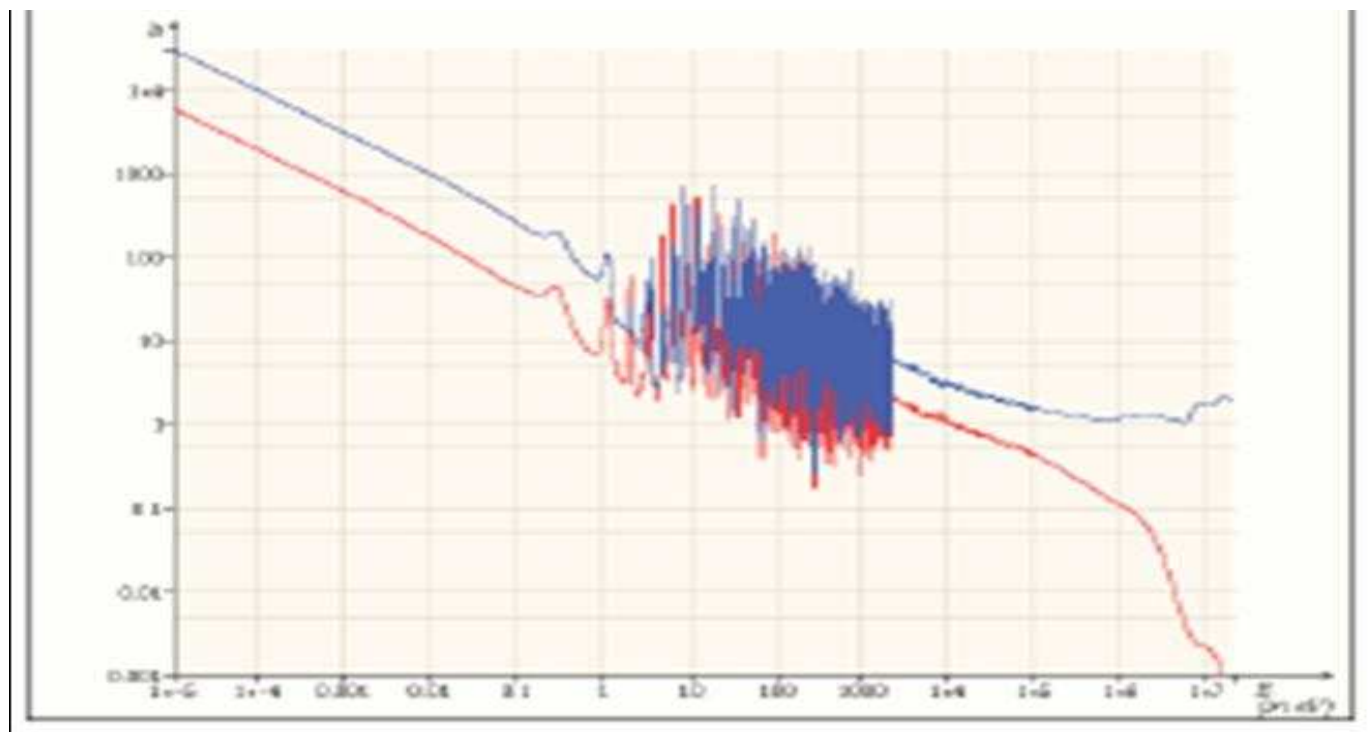


Source: EDF

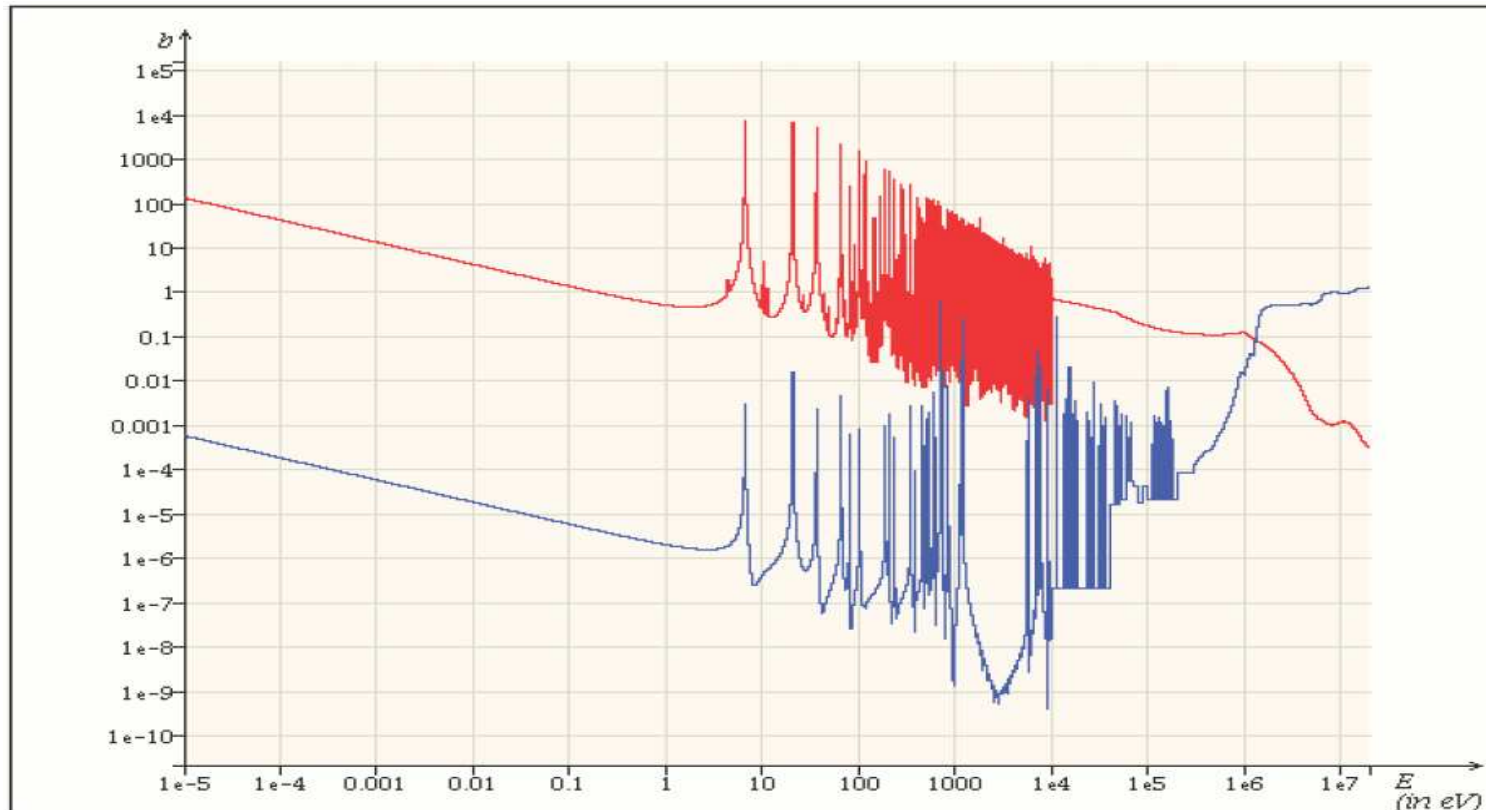
60 000 MWe



Sections efficaces de *fission* et de *capture* de l' ^{235}U



Sections efficaces de l' ^{238}U (fission et capture)

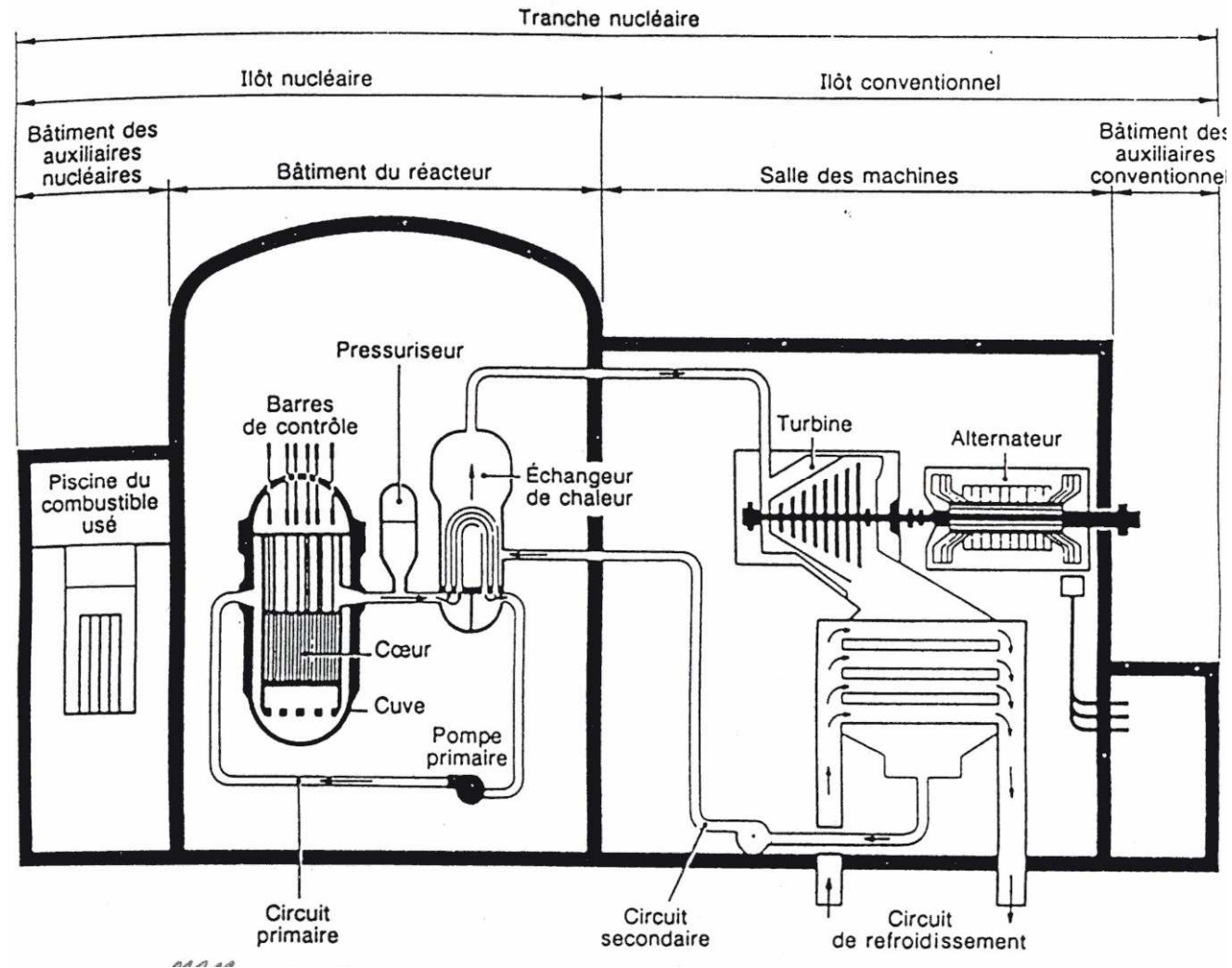


LE COMBUSTIBLE DES REACTEURS A EAU

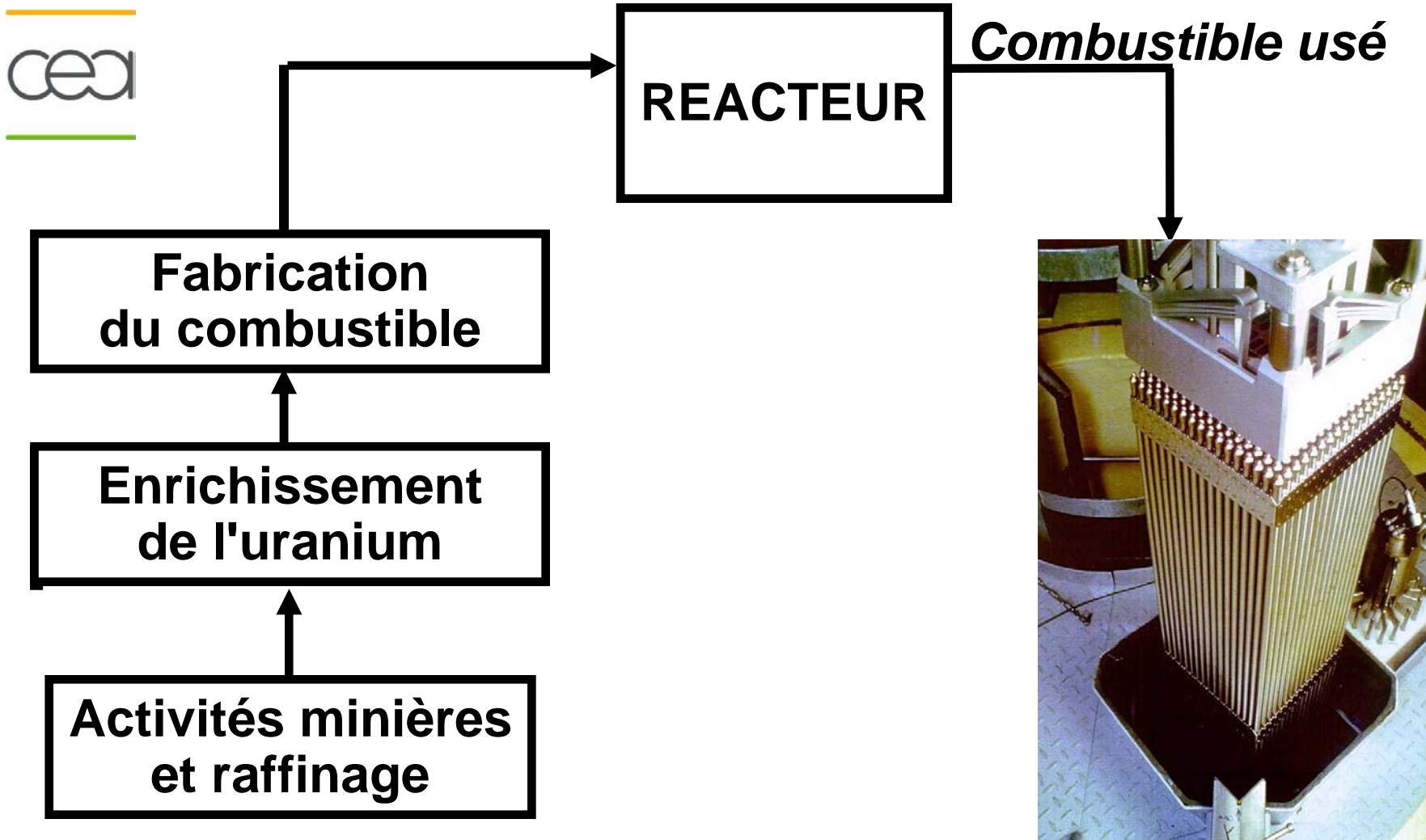


- des pastilles d'oxyde d'uranium enrichi en ^{235}U (dans une gaine métallique)
- et de l'eau:
 - pour ralentir les neutrons (modérateur)
 - pour extraire l'énergie libérée (caloporteur)

Schéma de principe d'un réacteur nucléaire



Le cycle du combustible du nucléaire



LE MINERAI D'URANIUM



Minerais: 0.5 à 10 kg U/ tonne

^{235}U : 0.7 %

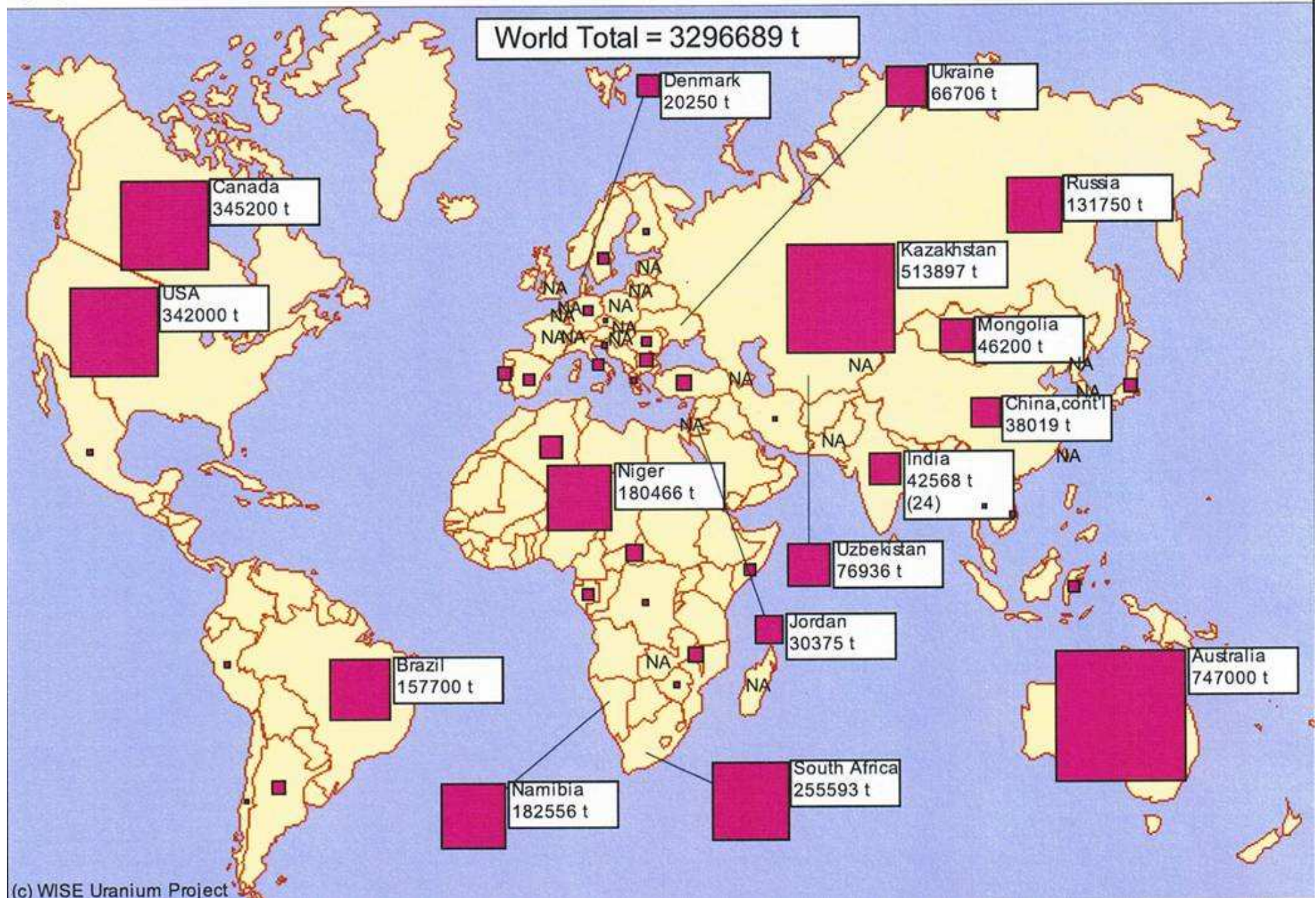
^{238}U : 99.3 %

Moyenne écorce terrestre : quelques grammes U/ tonne

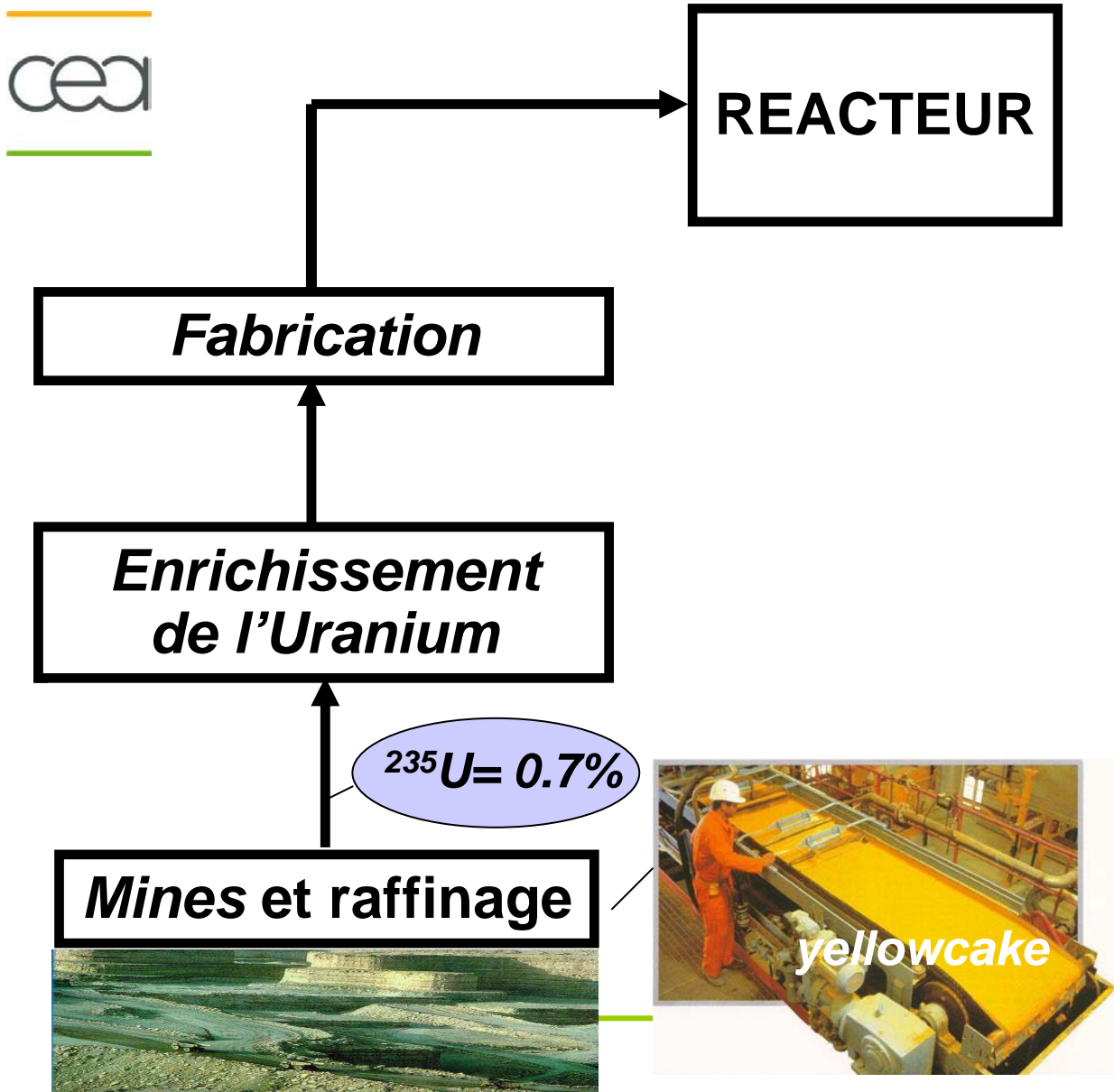
Eau de mer: qqs mg U / tonne eau

Uranium Resources (RAR - \$130/kg U)

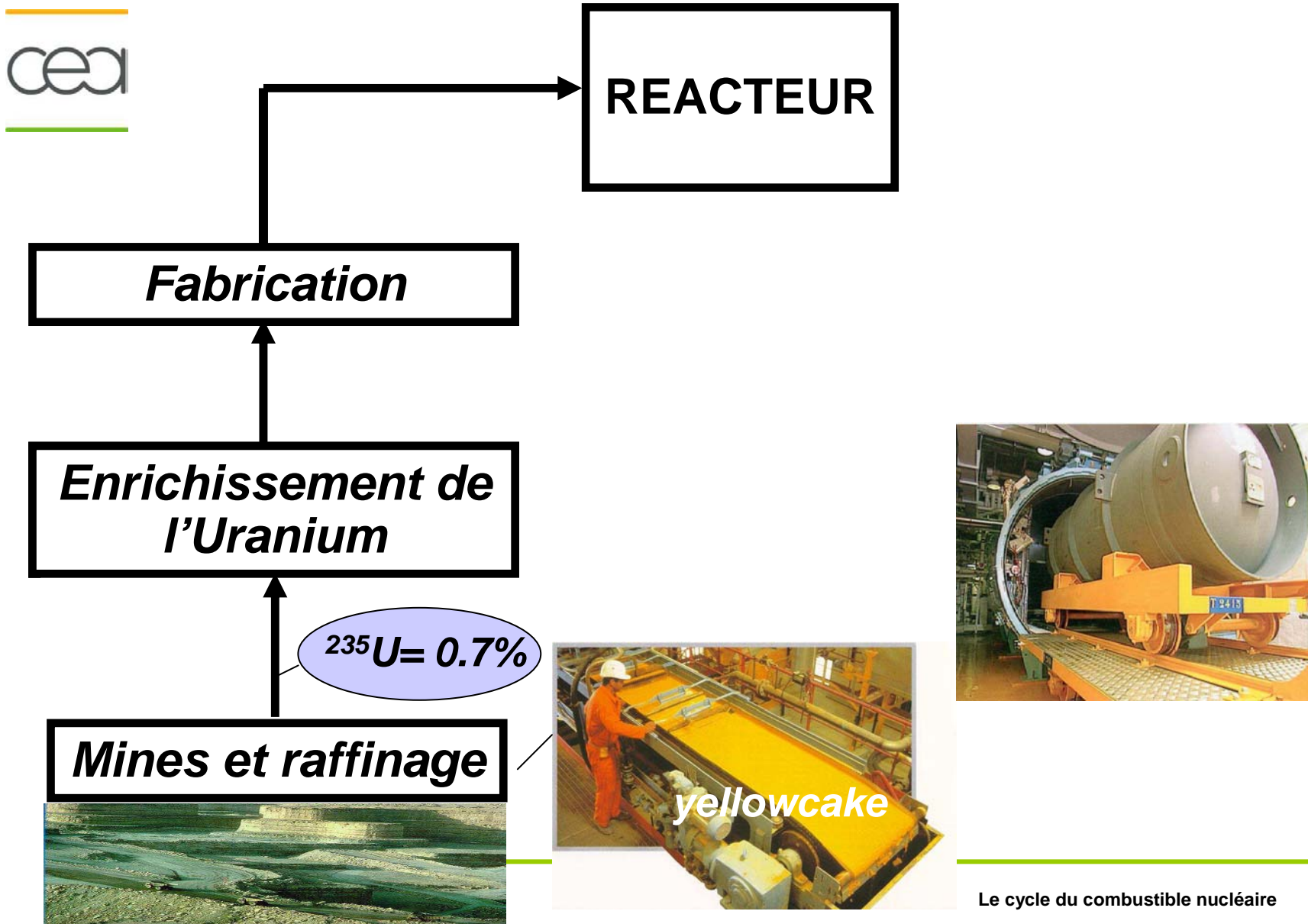
[t U] Reasonably Assured Resources, recoverable res. as of 1/1/2005, Cost range < US\$130/kg U (OECD 2006)



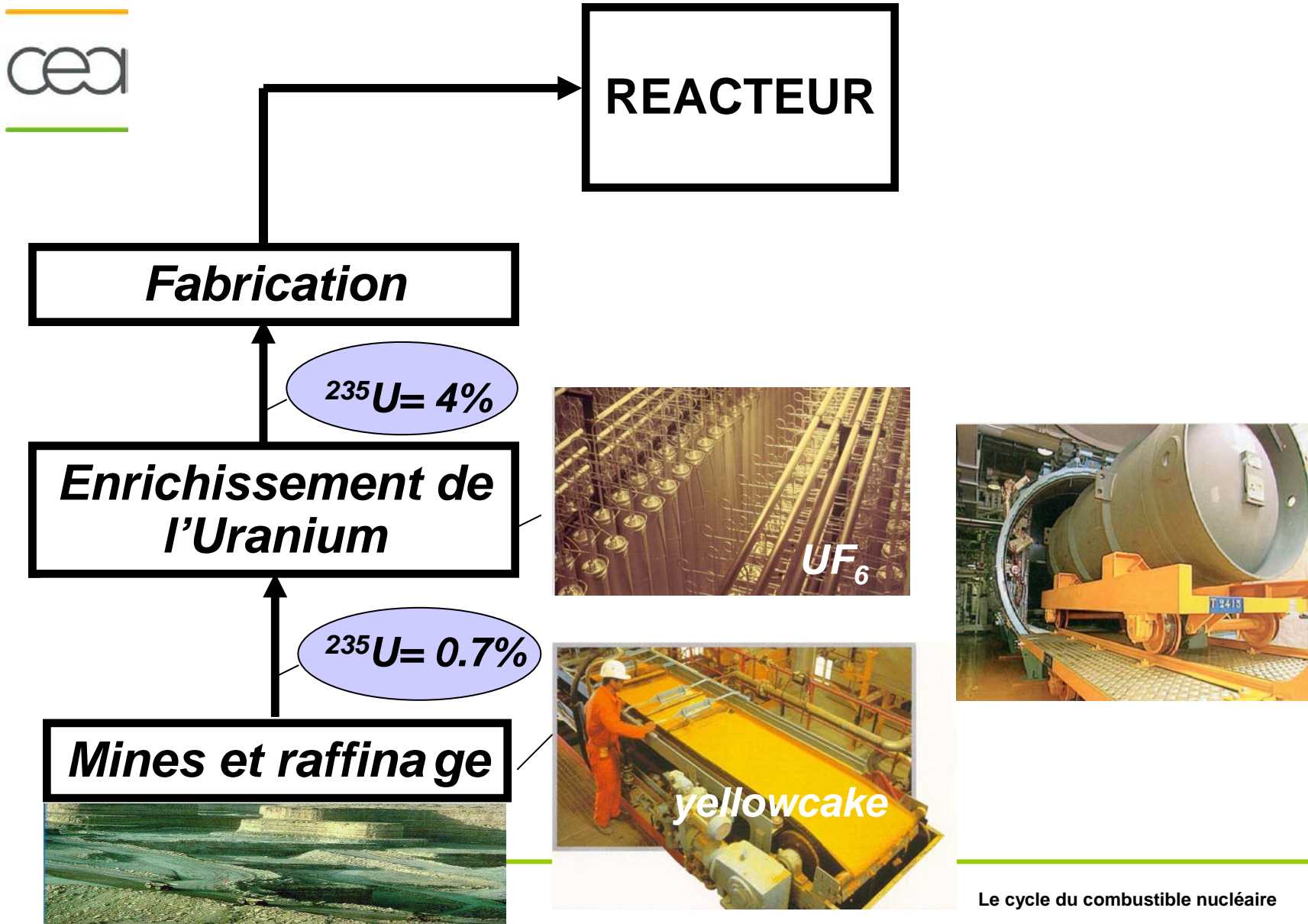
« L'AMONT » DU CYCLE



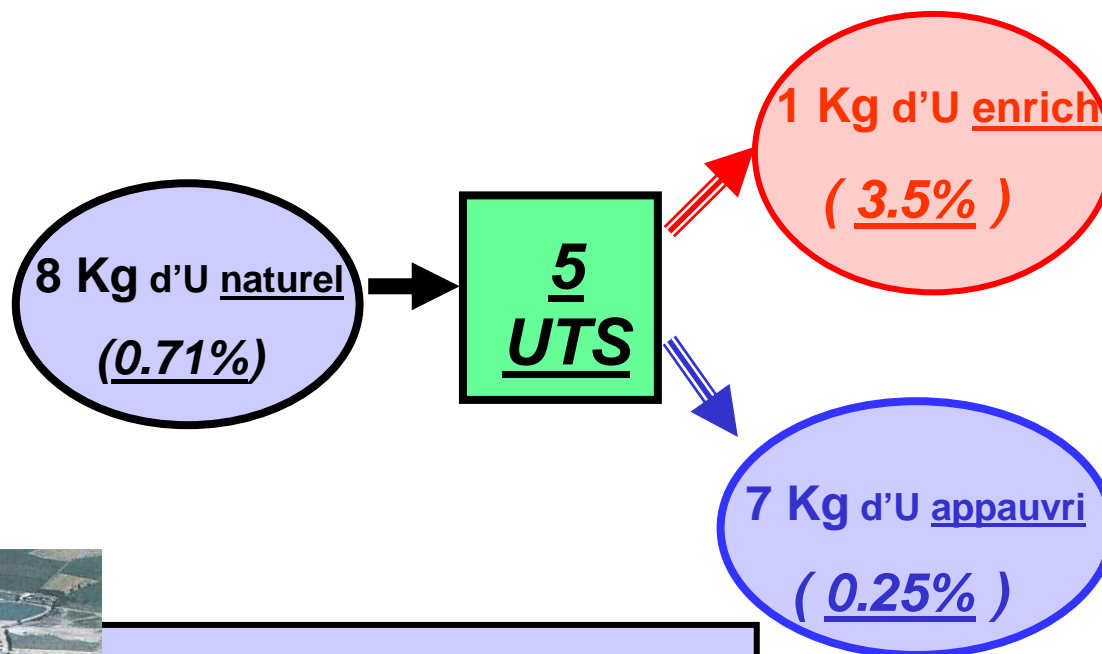
« L'AMONT » DU CYCLE



« L'AMONT » DU CYCLE



L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM



EURODIF:

10,8 millions UTS / an
(100 réacteurs.an)

1400 étages
(barrières poreuses)

3000 MW
(2400 kWh par UTS)

L'ENRICHISSEMENT

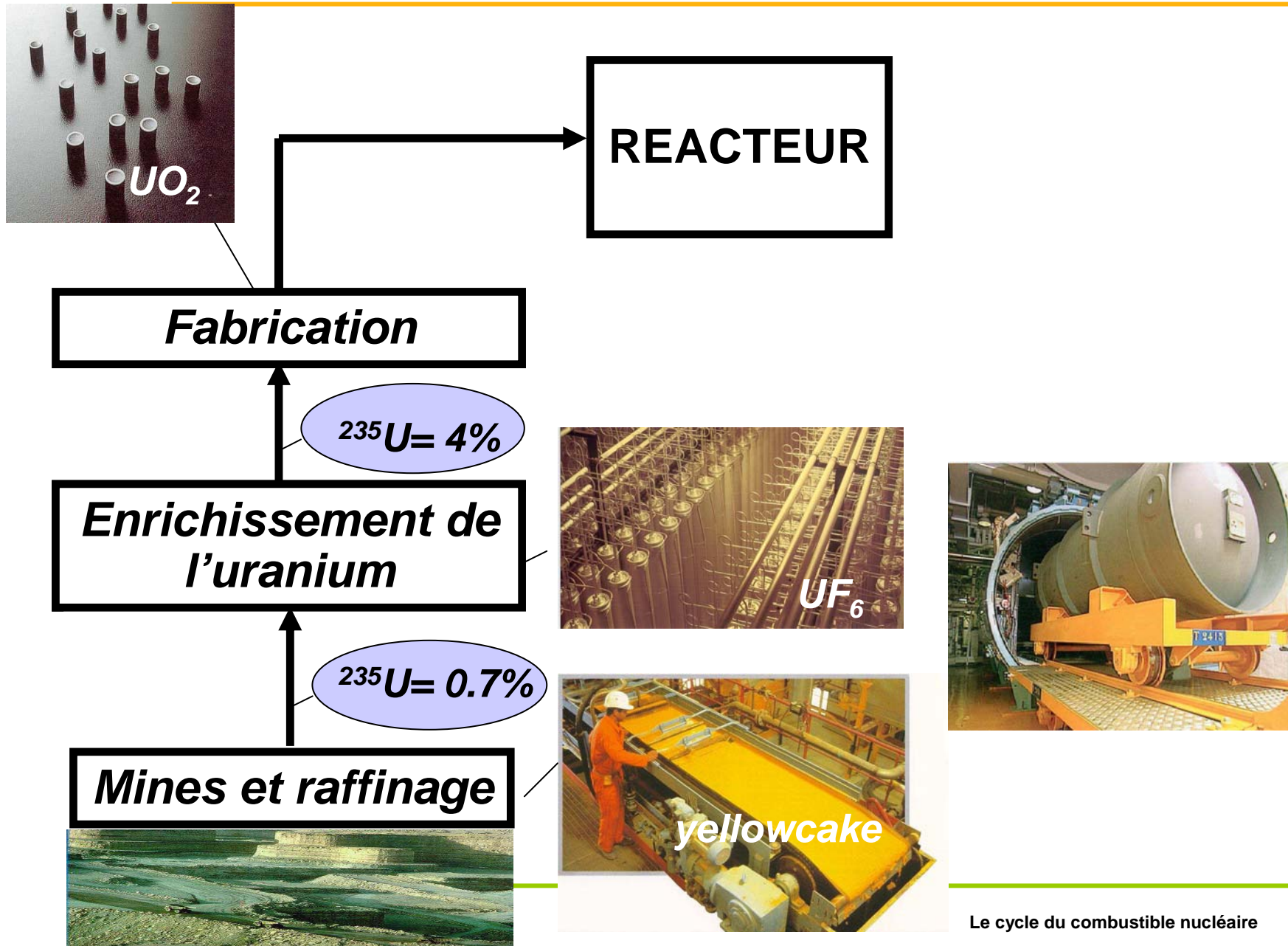


10,8 millions UTS / an
(production pour recharges
de 100 réacteurs à eau)

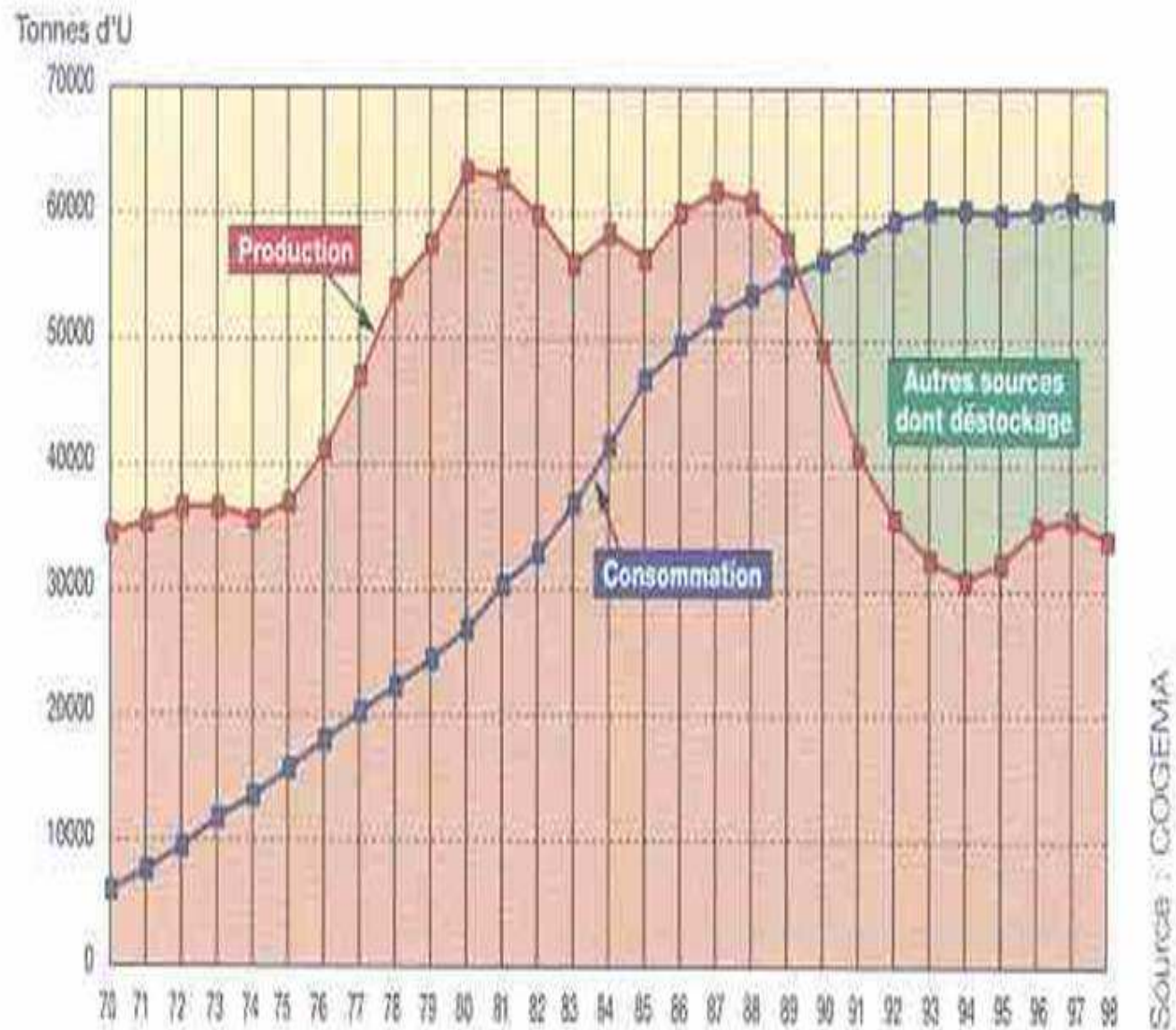
1400 étages
barrières en tubes de
céramique (pores $0,01 \mu$)

3000 MW
(2400 kWh par UTS)

« L'AMONT » DU CYCLE



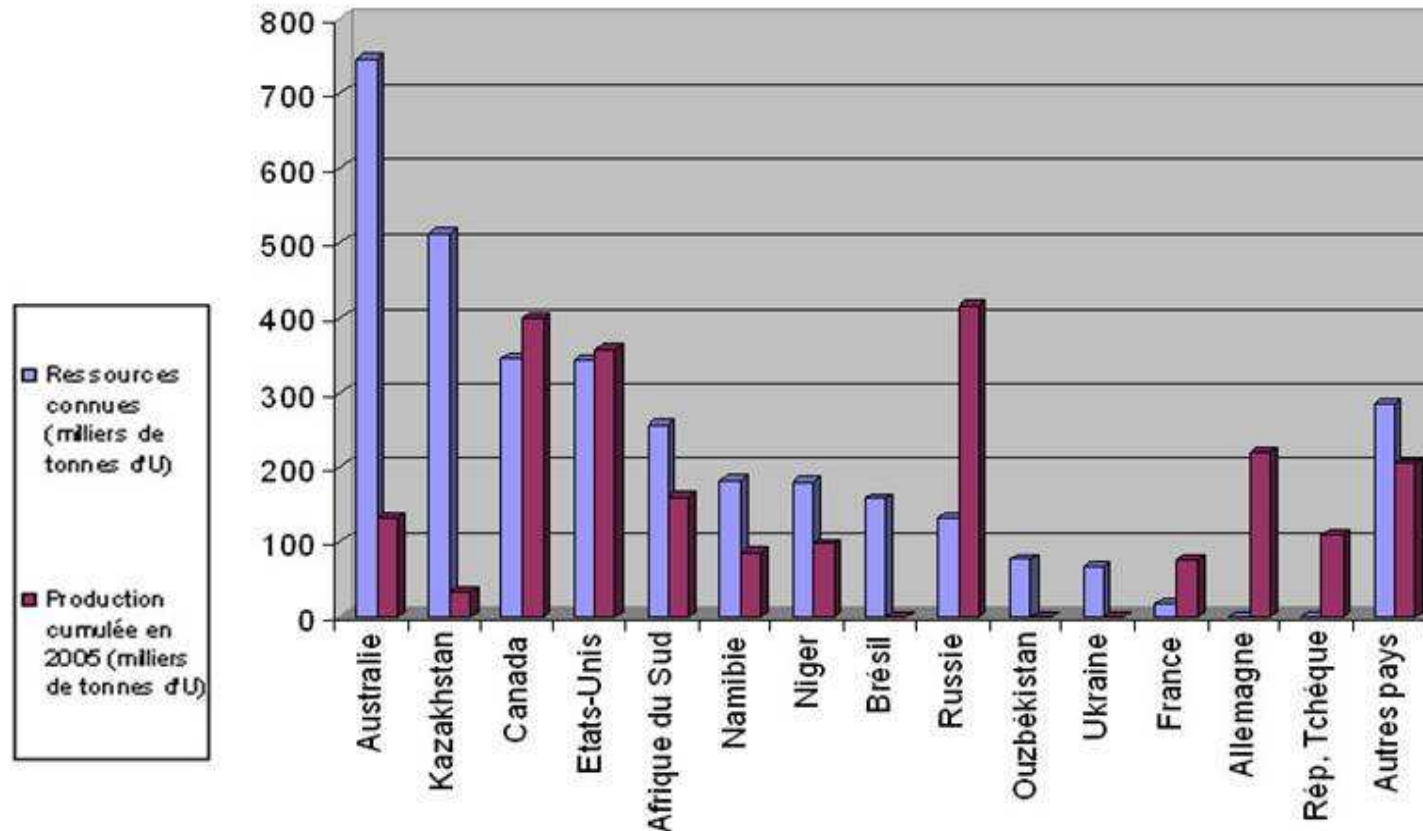
Production et consommation d'uranium naturel dans le monde



RESSOURCES UTILISEES ET RESSOURCES CONNUES

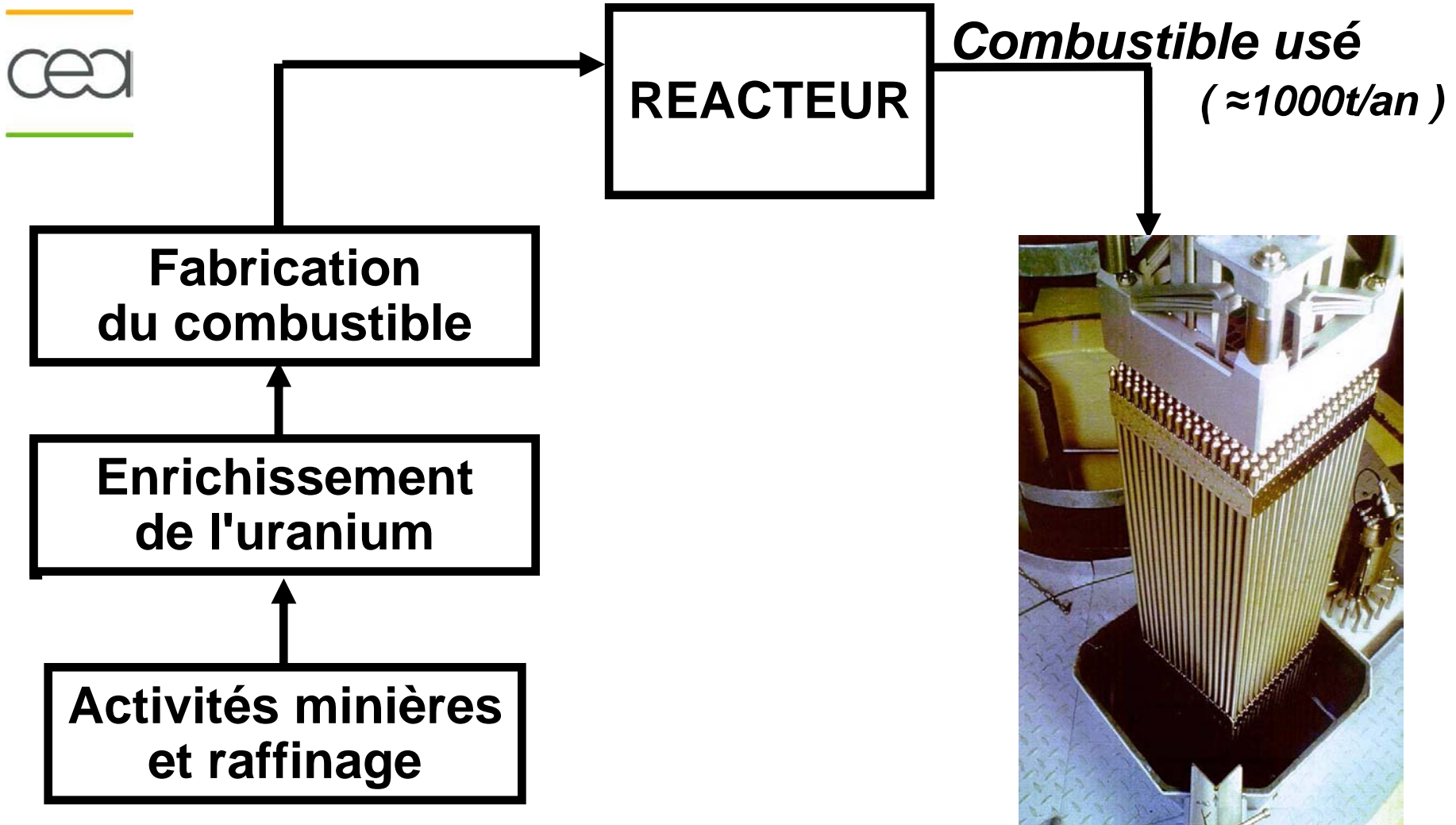


Répartition des ressources et de la production cumulée d'Uranium en 2005



- **2005: production mondiale 41 600 tonnes
consommation 67 500 tonnes**

Le cycle du combustible du nucléaire



Les résidus de la « combustion » nucléaire présentent des caractéristiques très différenciées



1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	A
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	Ln	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	An	104	105	106	107	108	109	110								
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun								

LANTHANIDES	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
ACTINIDES	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

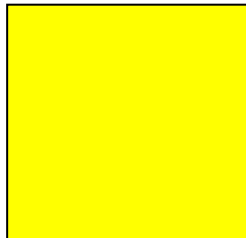
 NOYAUX LOURDS

 PRODUITS D'ACTIVATION

 PRODUITS DE FISSION

 PRODUITS DE FISSION ET D'ACTIVATION

LE COMBUSTIBLE USE



Uranium (**95%**)

■ produits de fission(4%)

■ plutonium (**1%**)

■ actinides mineurs(0.1%)

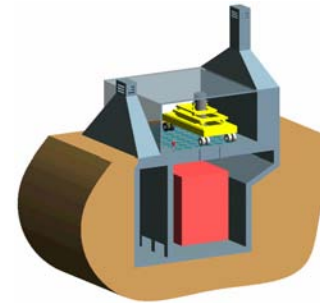
Composition moyenne



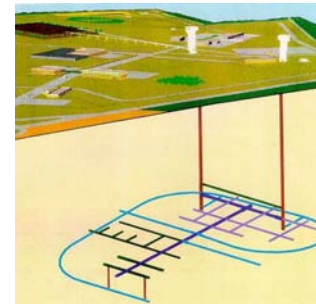
LA GESTION EN AVAL : QUELLES OPTIONS ?



ENTREPOSAGE

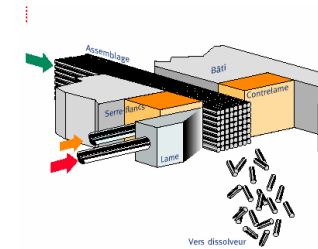


- STOCKAGE DIRECT



YUCCA MOUNTAIN, NEVADA

- RECYCLAGE



LE COMBUSTIBLE USE



235U=0.9%

Uranium (**95%**)

■ produits de fission(4%)

■ plutonium (**1%**)

■ actinides mineurs(0.1%)

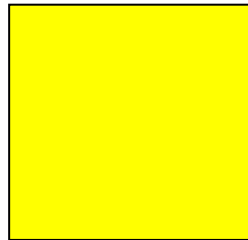
Composition moyenne



LE COMBUSTIBLE USE



$^{235}\text{U}=0.9\%$



Uranium (**95%**)

■ produits de fission(4%)

■ plutonium (**1%**)

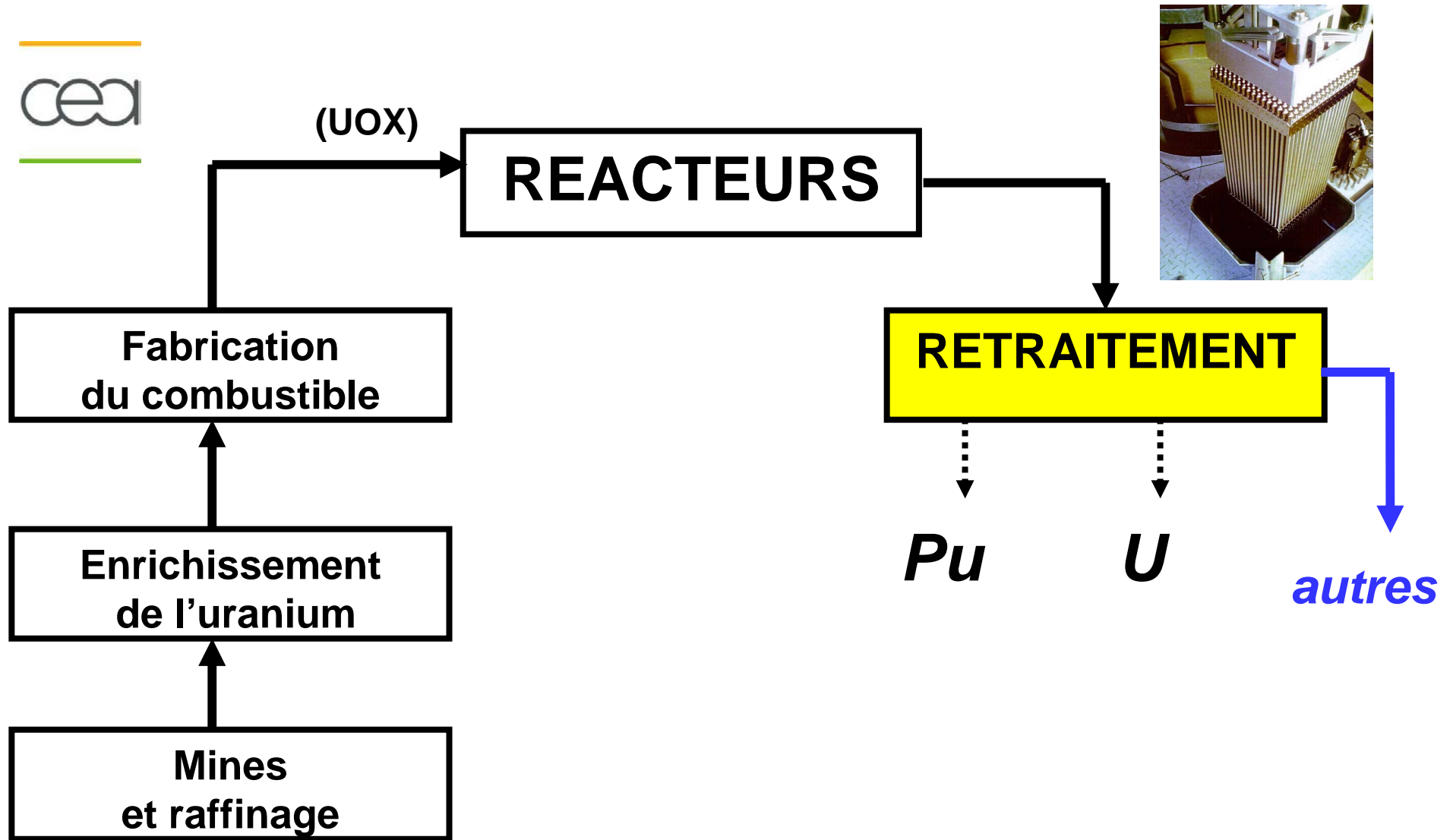
■ actinides mineurs(0.1%)

Composition moyenne

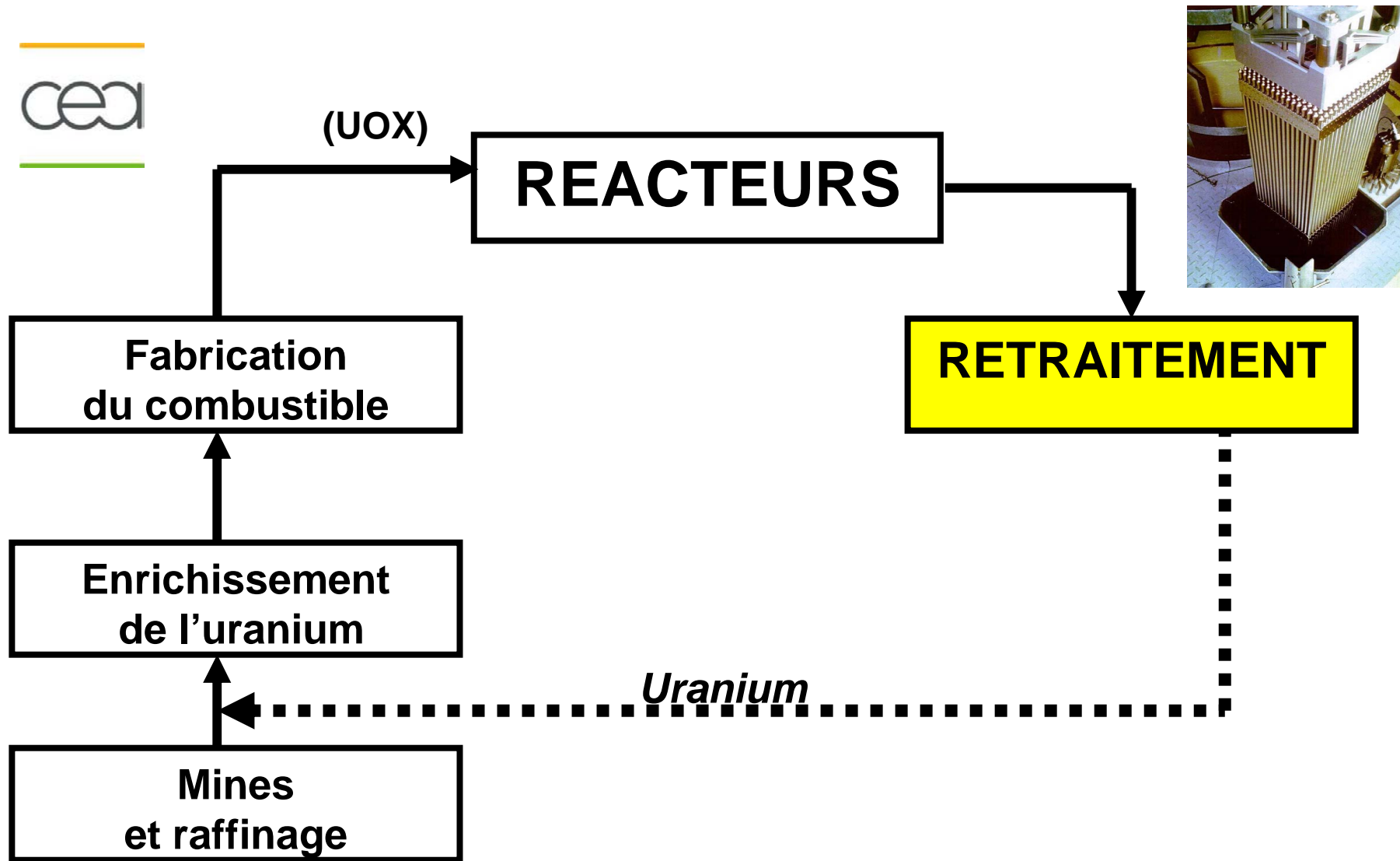


isotopes fissiles = 75%

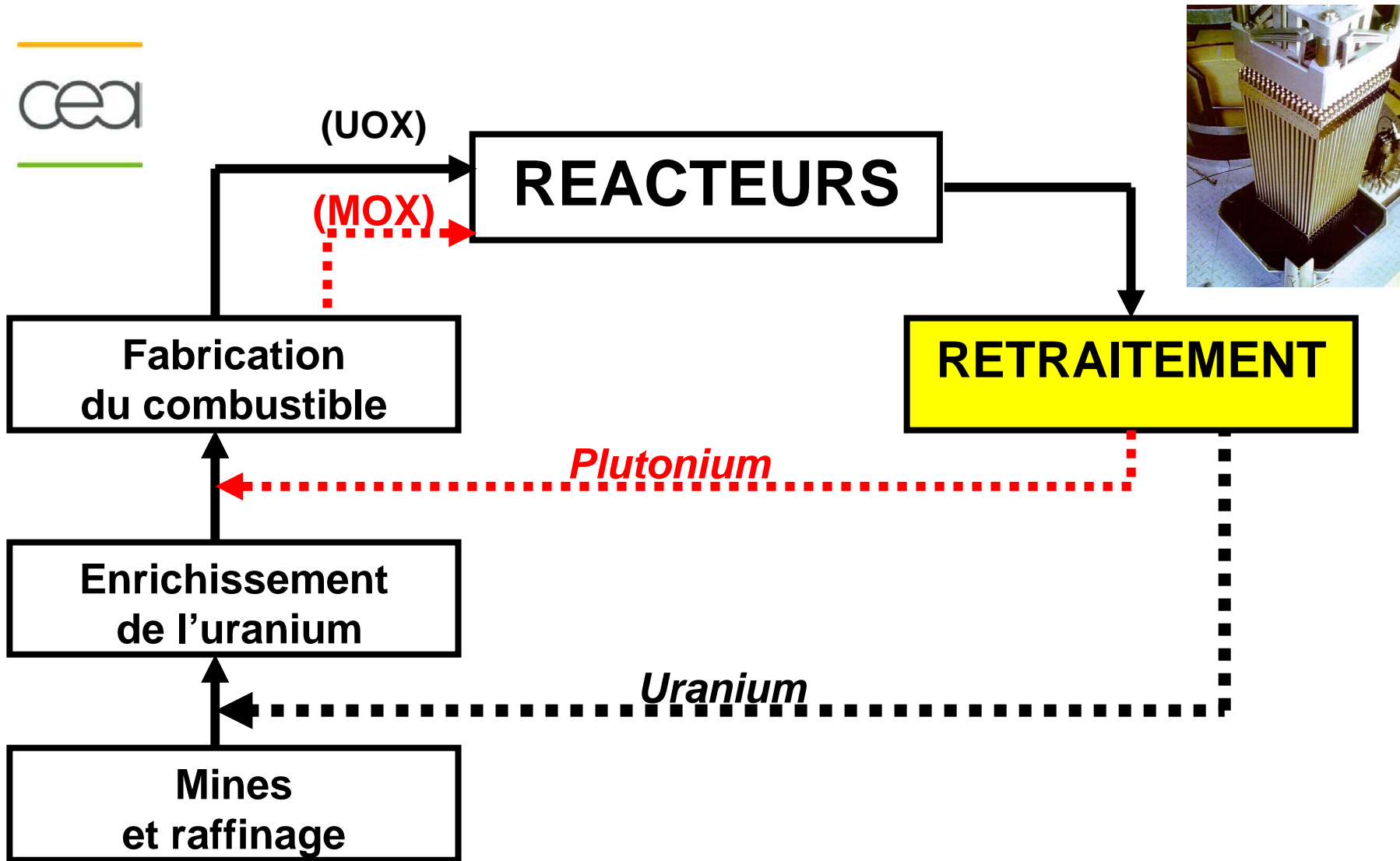
LA STRATEGIE DE RECYCLAGE



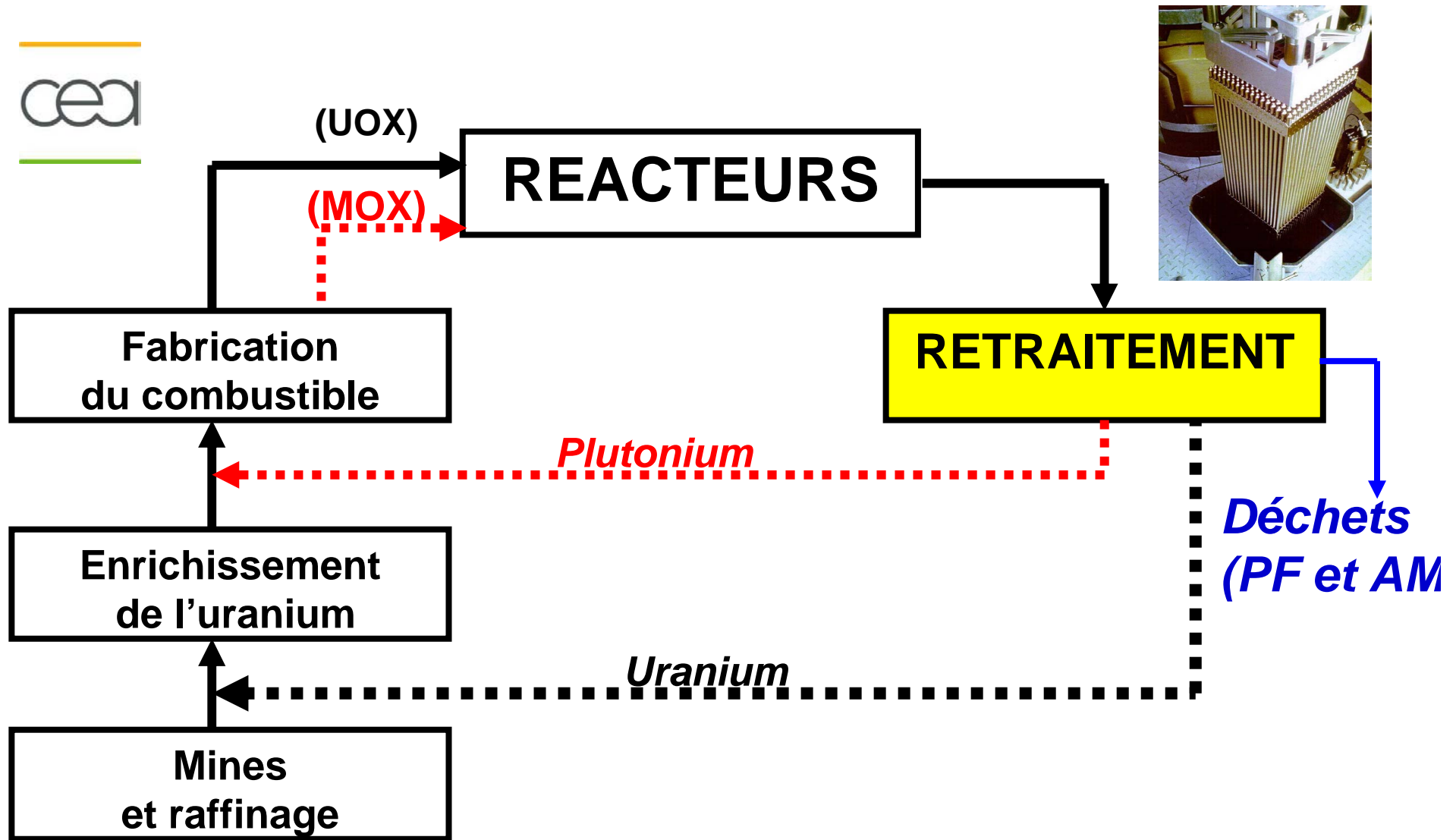
LA STRATEGIE DE RECYCLAGE



LA STRATEGIE DE RECYCLAGE

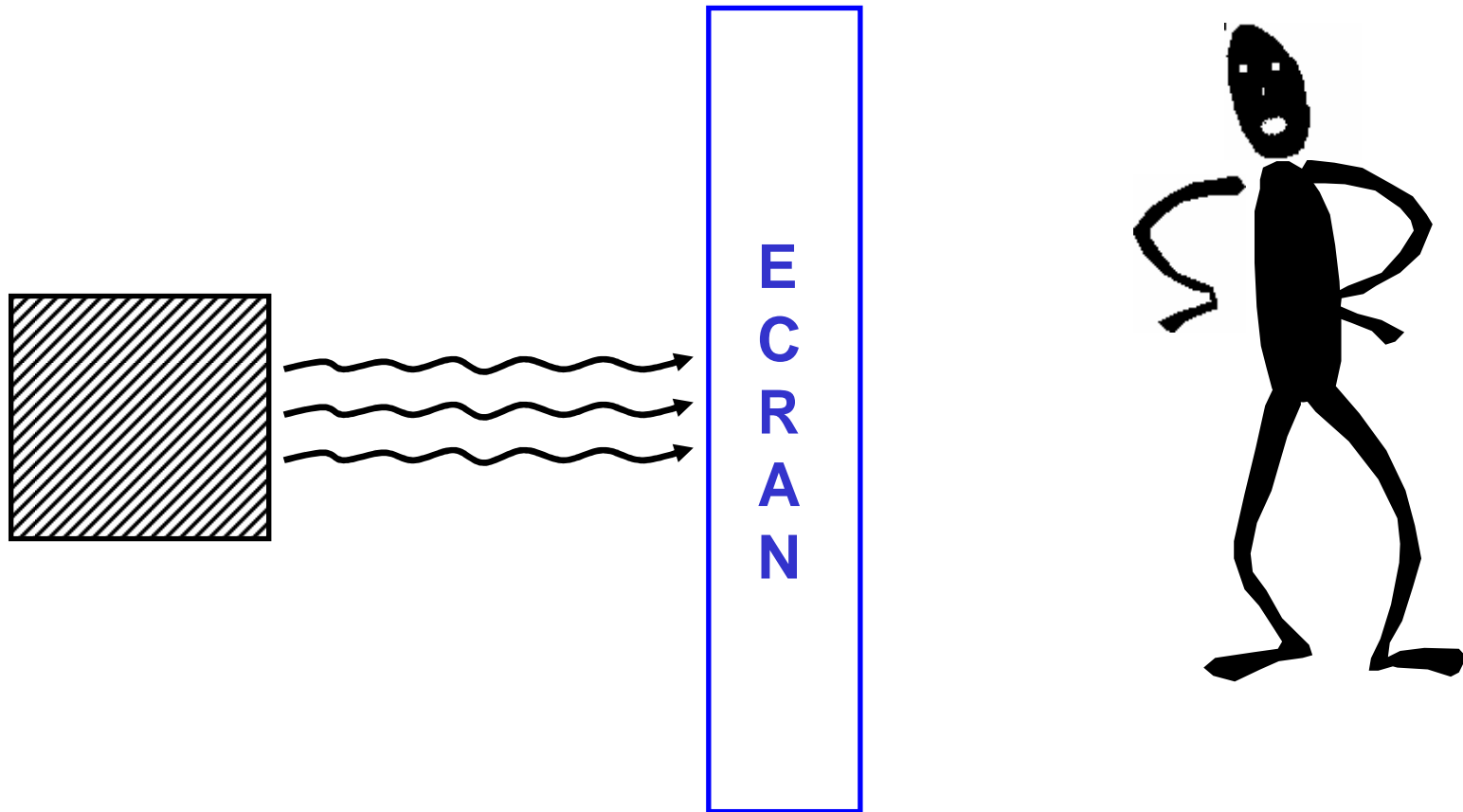


LA STRATEGIE DE RECYCLAGE



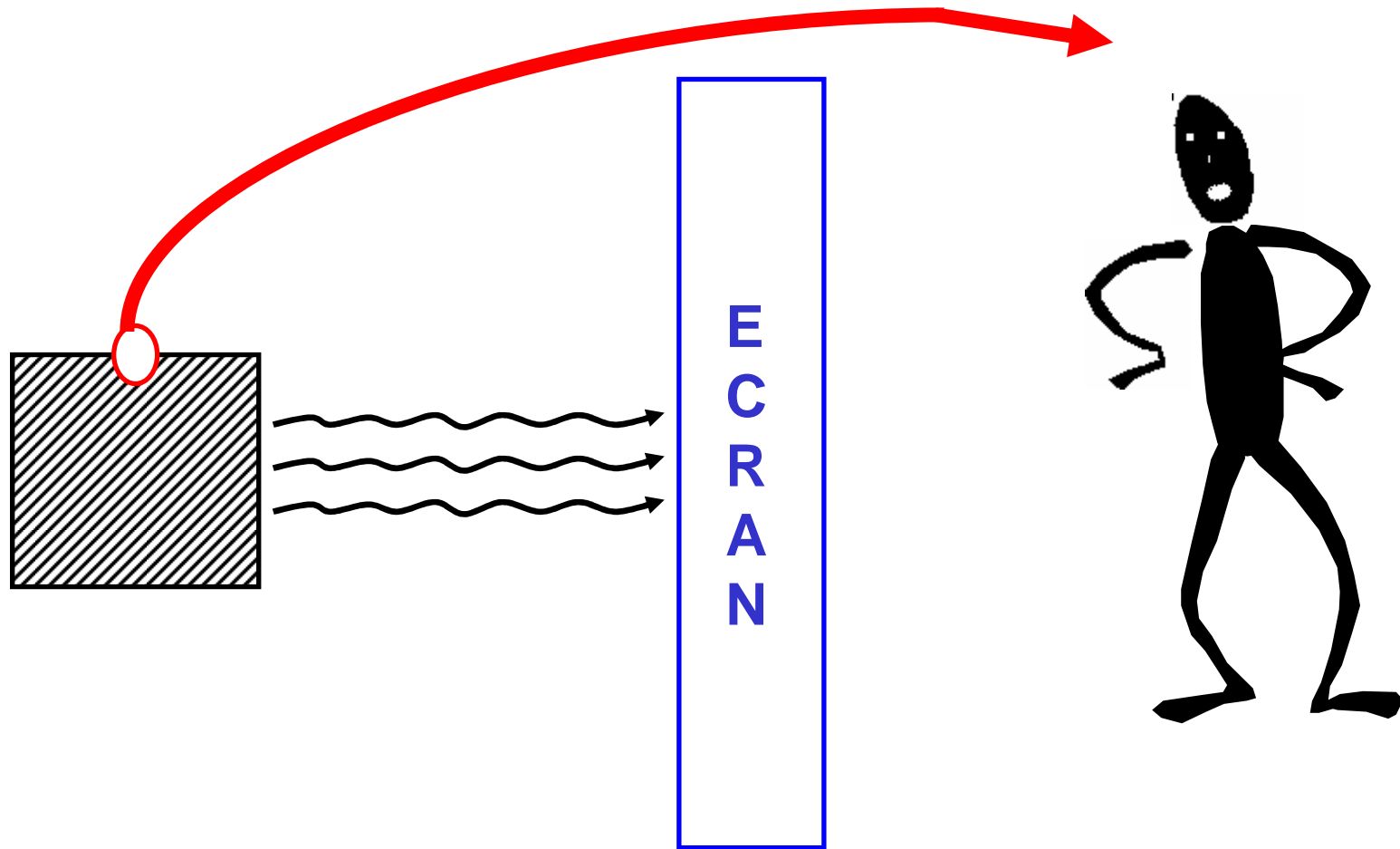
Les déchets radioactifs : quels dangers ?

cea



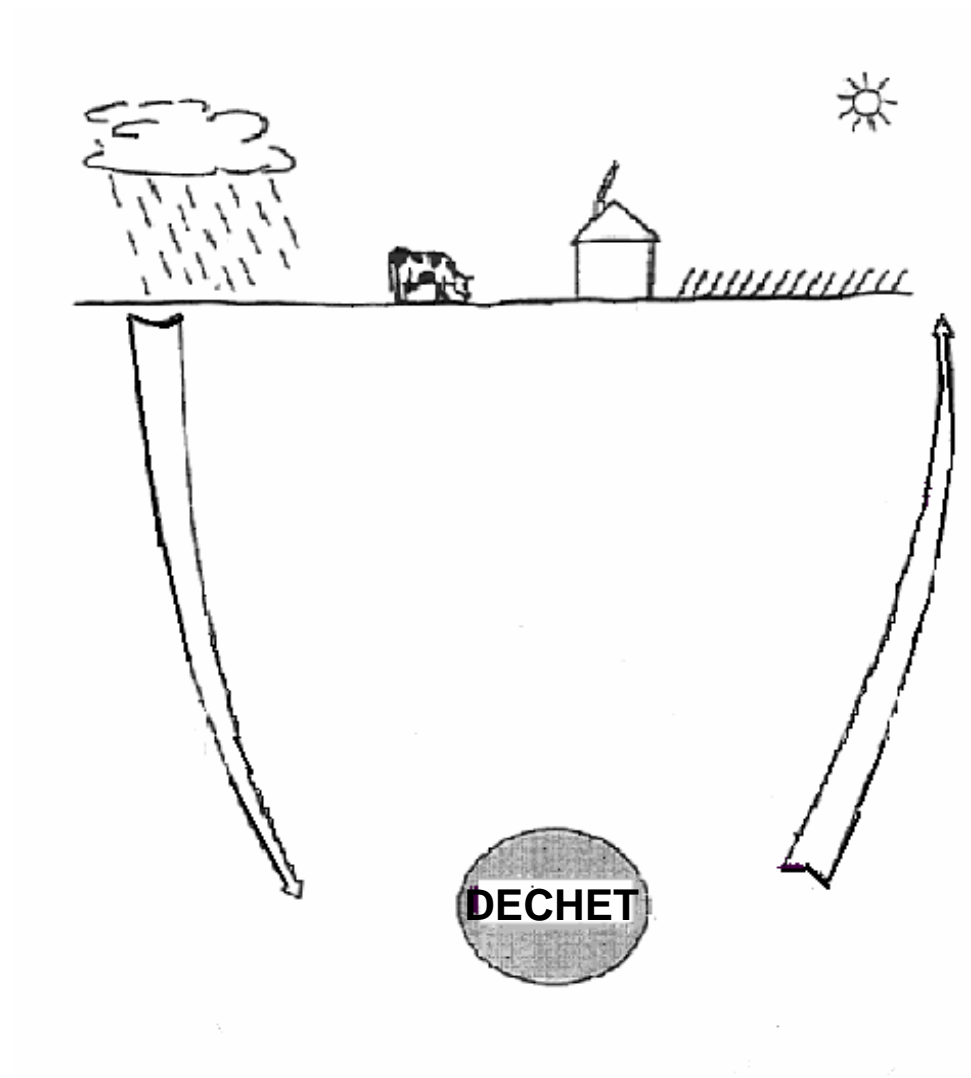
Les déchets radioactifs : quels dangers ?

cea

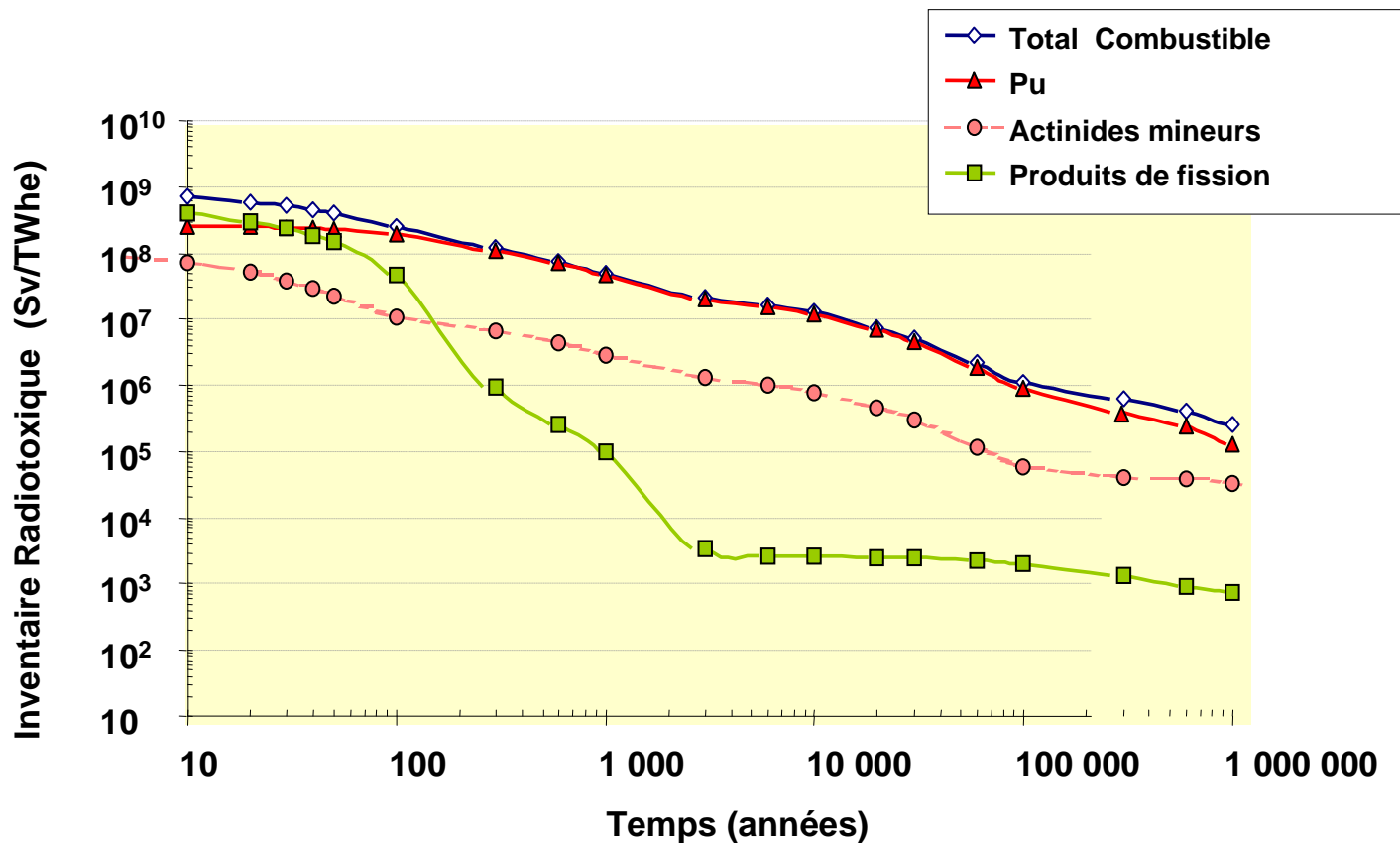


Problématique du stockage des déchets

cea

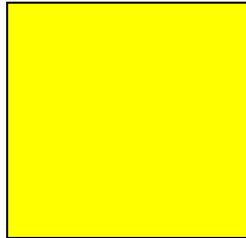


Contributeurs à la radiotoxicité du combustible utilisé



(DPUI par ingestion, CIPR72)

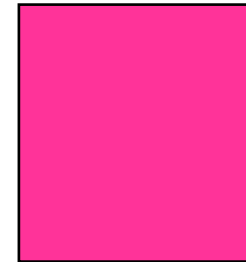
Le combustible nucléaire utilisé



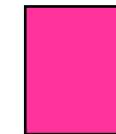
Uranium

- produits de fission
- plutonium
- actinides mineurs

Composition moyenne



Plutonium

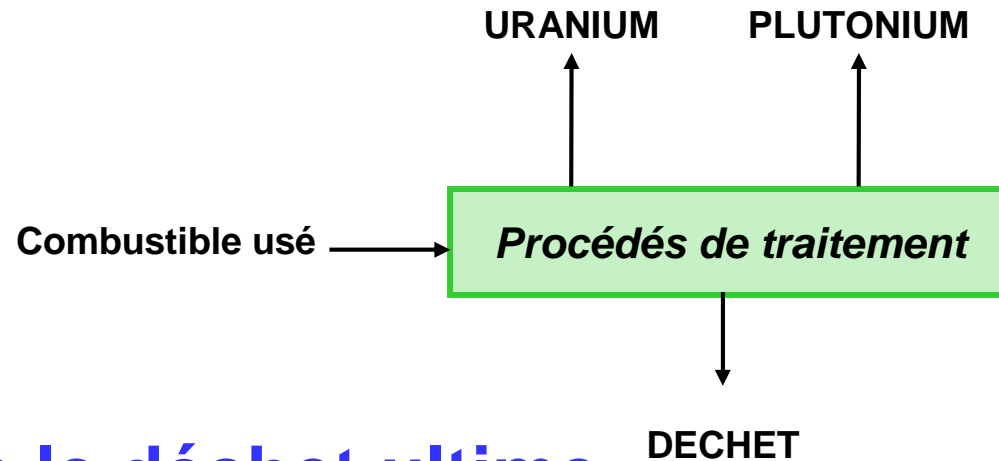


actinides mineurs

- produits de fission

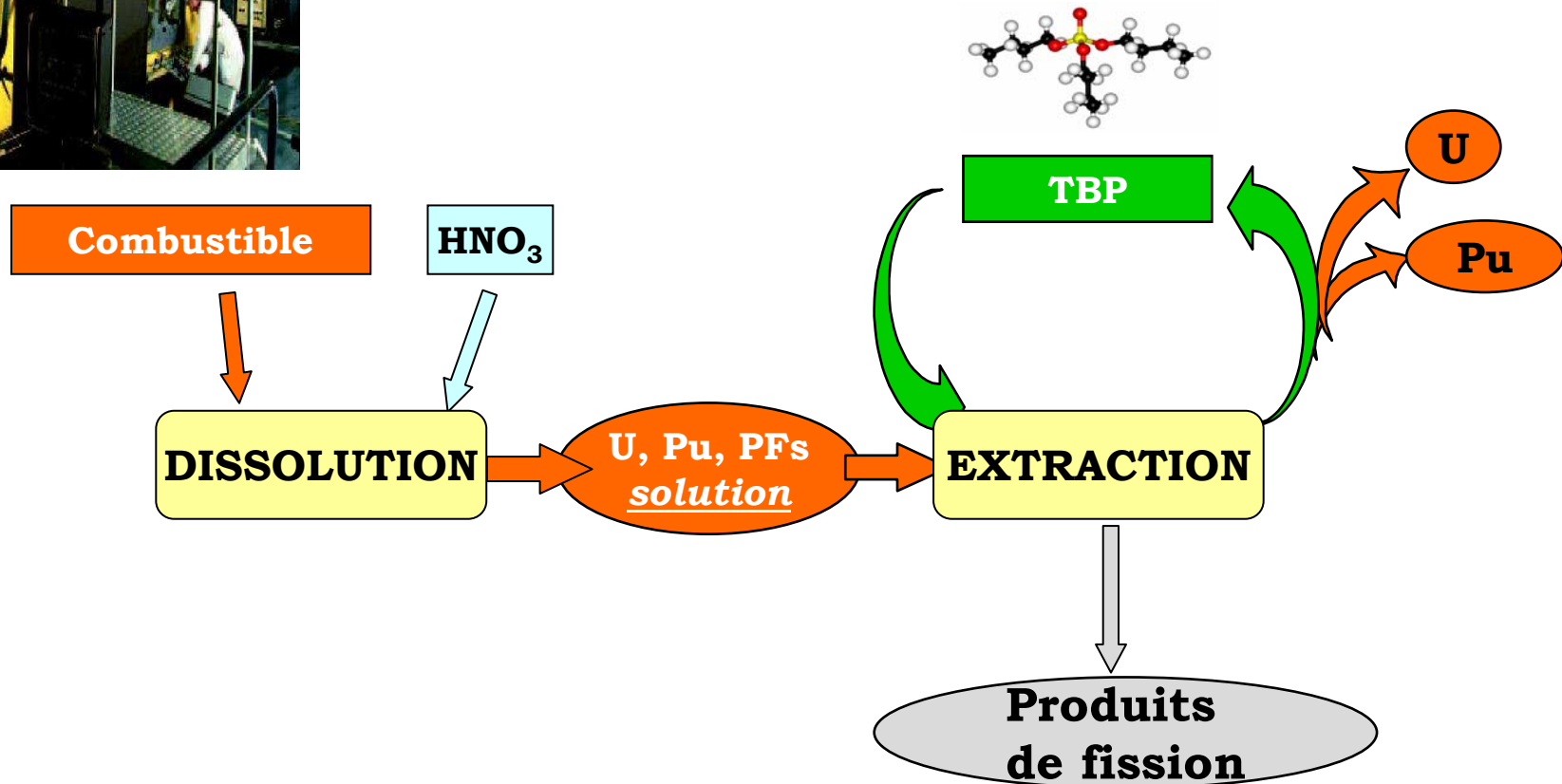
Radiotoxicité après 1 000 ans

Pourquoi retraiter ?



1. Pour réduire le déchet ultime
2. Pour le confiner durablement
3. Pour recycler les matières valorisables

LE PROCEDE "PUREX"



LES USINES DE LA HAGUE

CE



LE TRANSFERT DES COMBUSTIBLES USES

cea



LES PISCINES D'ENTREPOSAGE



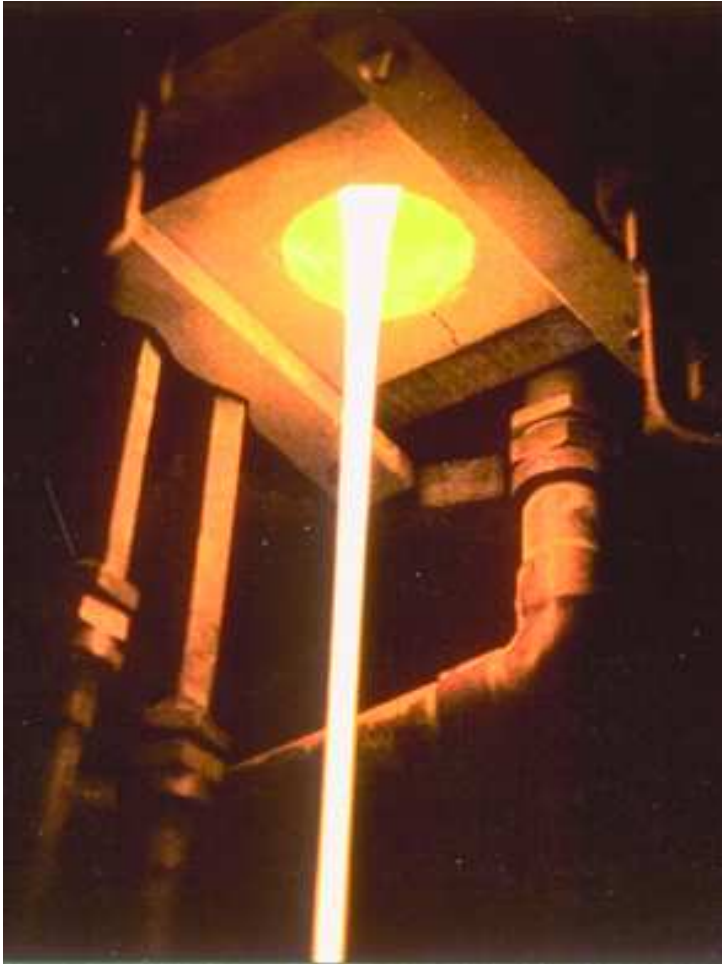
LE COMBUSTIBLE MOX



- *20 réacteurs du parc français sont partiellement chargés avec du combustible MOX*
- *Plusieurs tonnes de plutonium sont recyclées chaque année*

La vitrification des déchets

cea



**Conteneur de
déchets
vitrifiés**



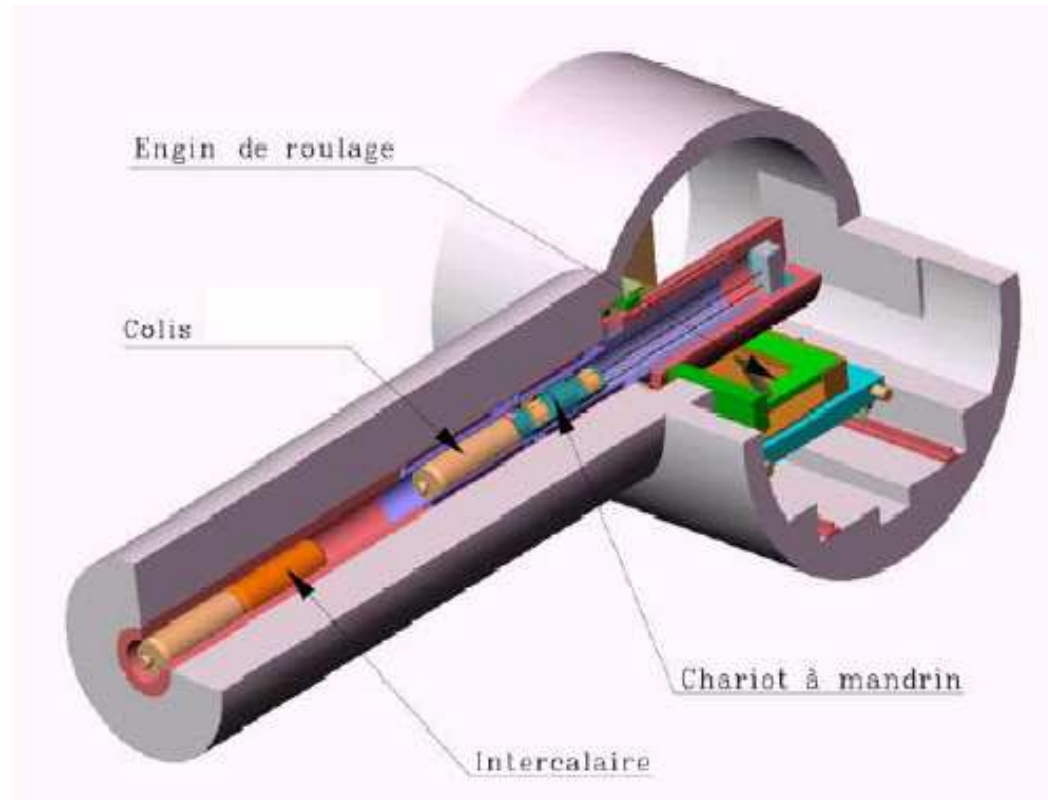
ANDRA : les choix de concepts pour les verres



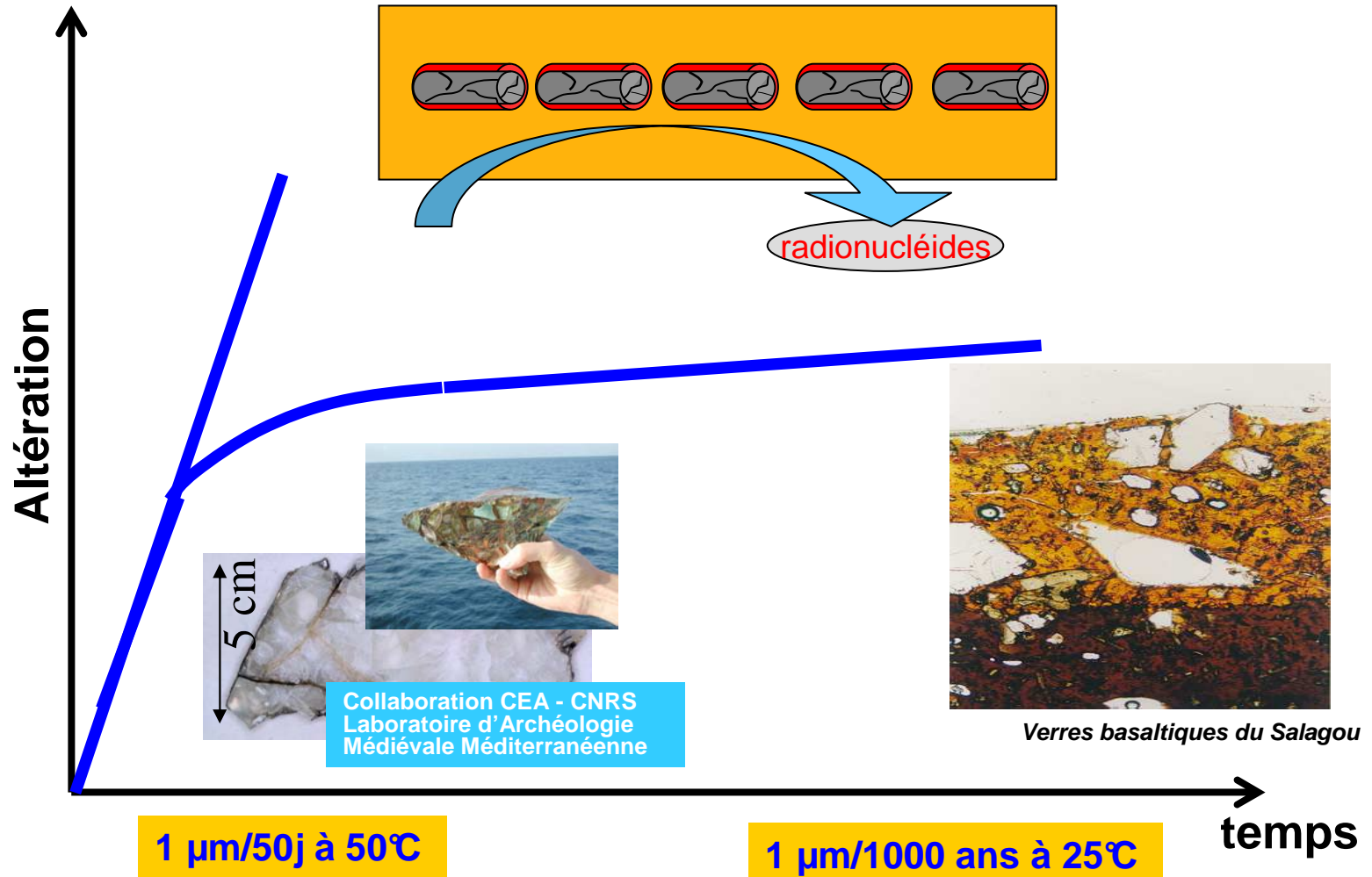
Alvéole de stockage :

- tunnels horizontaux, dans lesquels les colis sont placés horizontalement

Colis de stockage :
complément de colisage
en acier non allié
d'épaisseur 55 mm,
étanche à l'eau pendant
~1000 ans



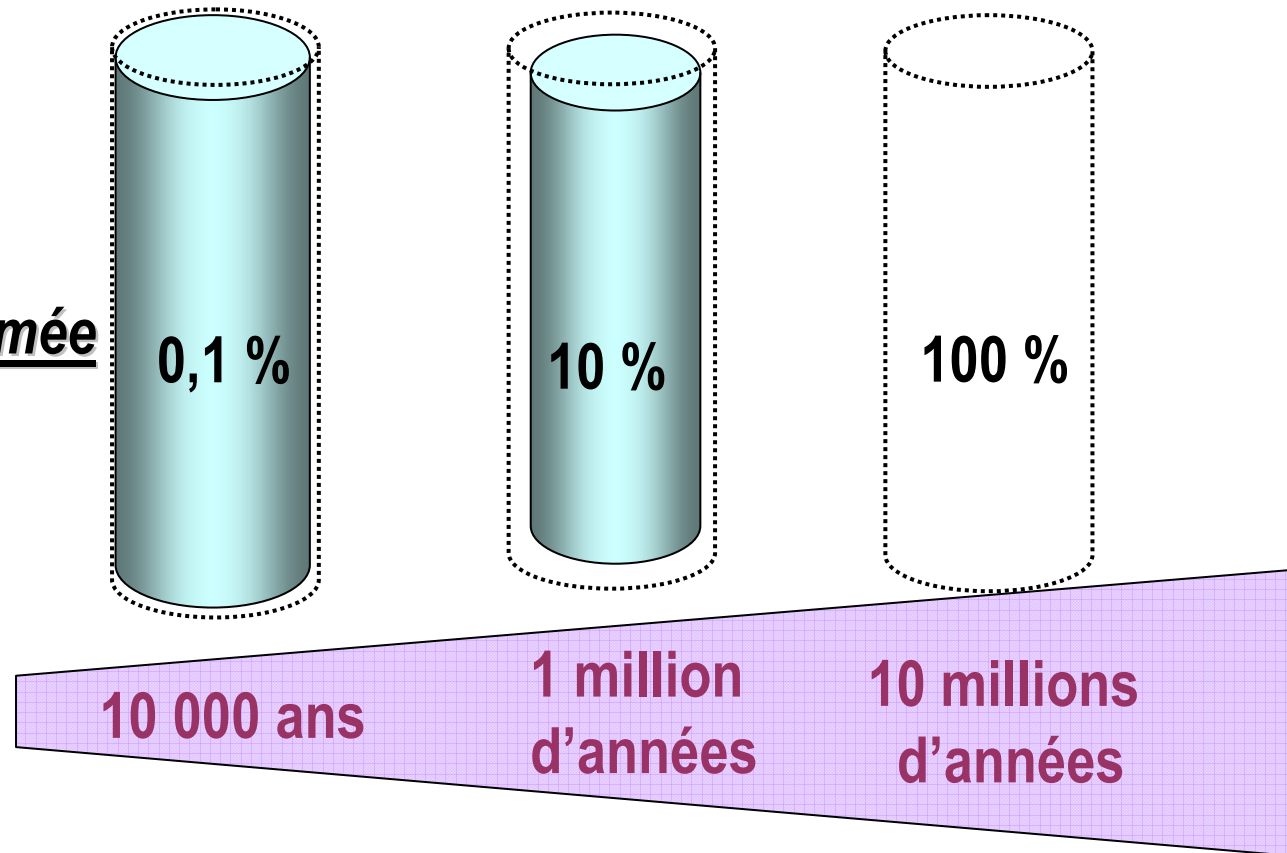
ALTERATION EN STOCKAGE GEOLOGIQUE



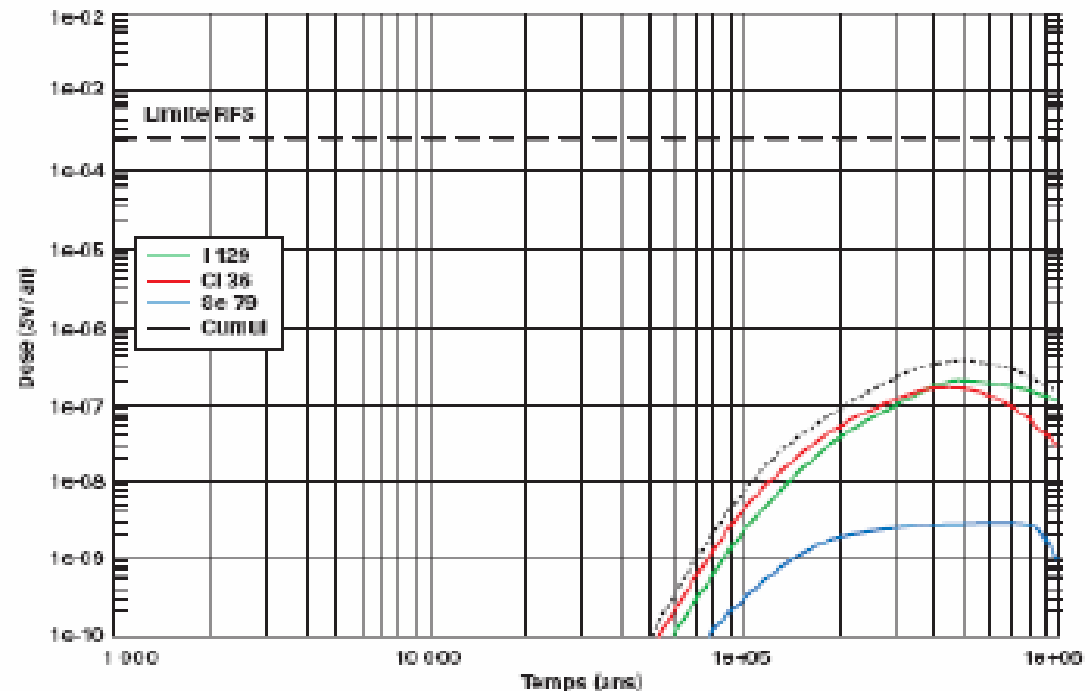
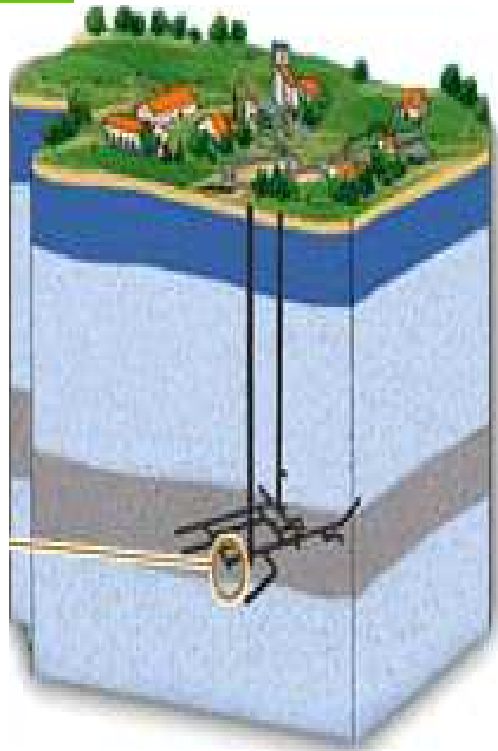
Simulations de comportement à long terme



Altération estimée
par l'eau



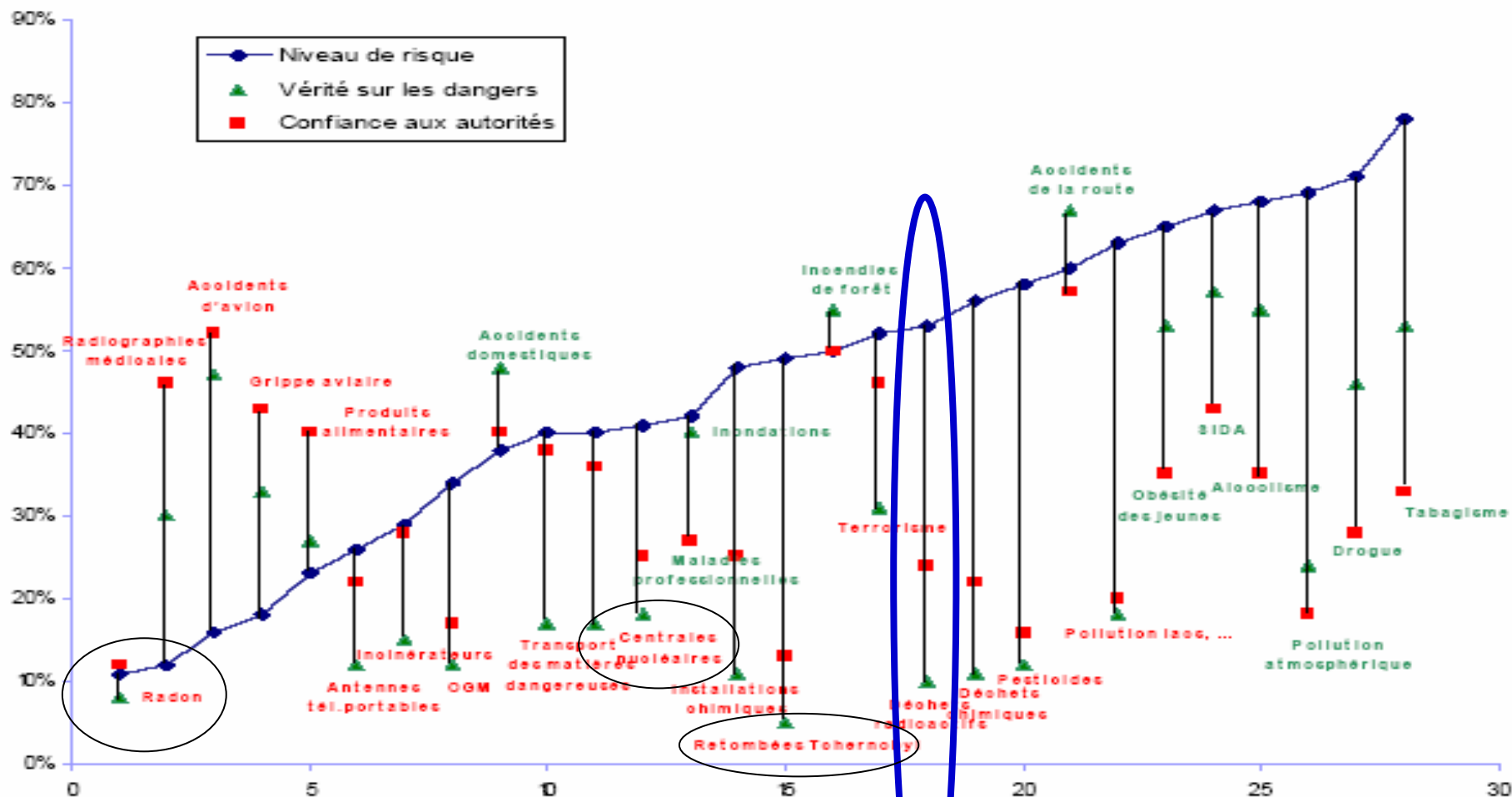
LE STOCKAGE DES DECHETS ULTIMES



*Evolution de la dose à l'exutoire (Saulx)
au cours du temps.*

« LA VERITE » SUR LES RISQUES...

Sources : Baromètre IRSN 2006



POURQUOI?

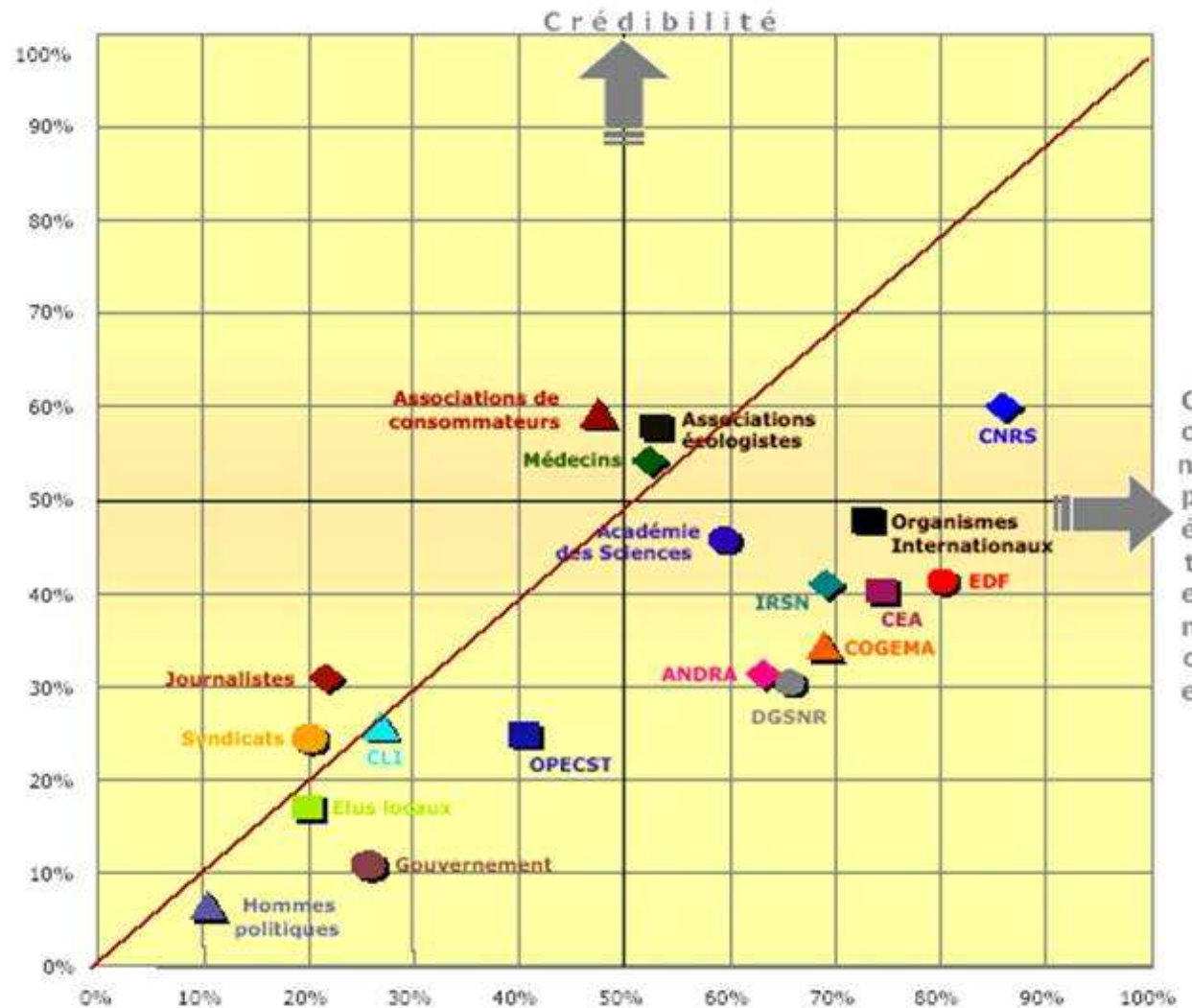


- une information insuffisante ...?
- des sources discréditées ...?
- Un clivage culturel...?
- La radioactivité,
phénomène imperceptible...?
(« *Qu'est-ce qu'un déchet nucléaire?* »)
- *Autres (éthique ?)... ?*



Le public et les sources d'information...

Baromètre IRSN 2006



La loi du 30 décembre 1991 (suite)



- Relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue
- 3 AXES DE RECHERCHE :
 - séparer et transmuter éléments à vie longue ;
 - stockage dans couches géologiques profondes ;
 - conditionnement et entreposage de longue durée.
- 15 années de recherches (évaluées annuellement), pour aboutir à un nouveau projet de loi en 2006

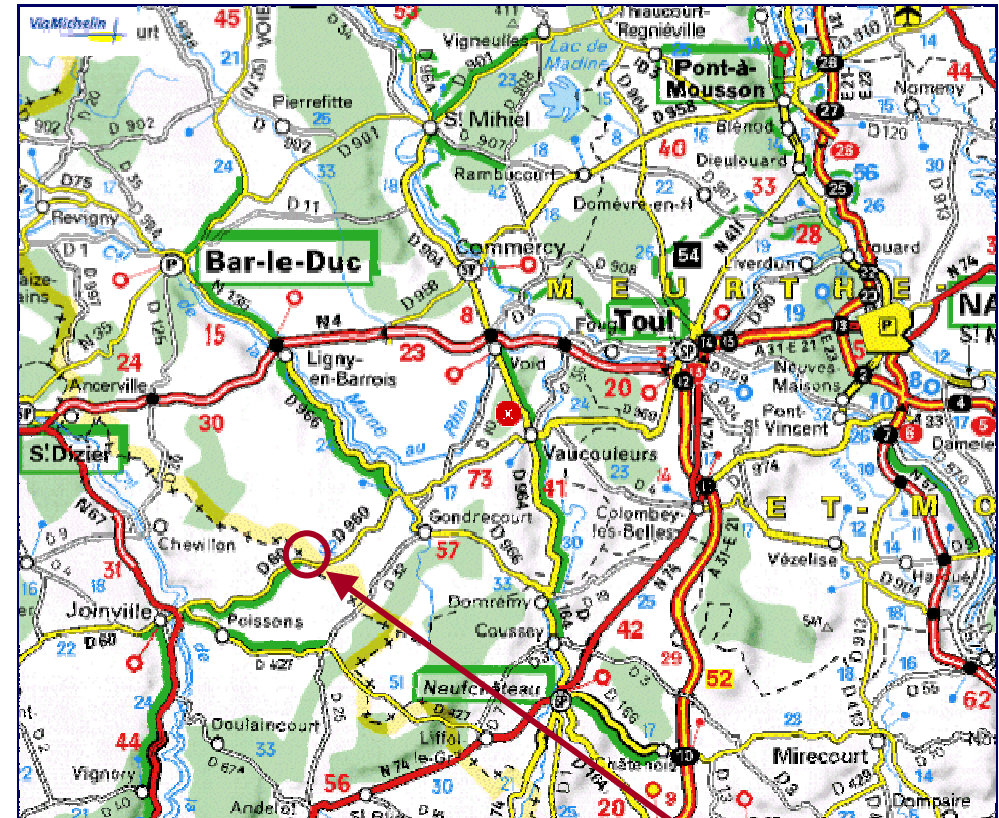
Les recherches sur le stockage des déchets (ANDRA)

<http://www.andra.fr/>

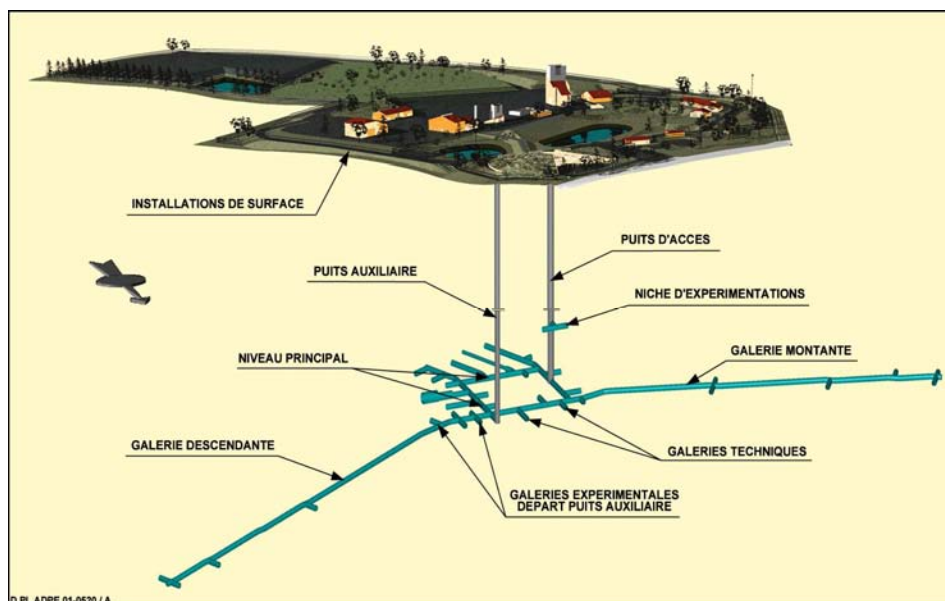


enjeu : la faisabilité du stockage géologique.

- ⇒ le laboratoire souterrain de Bure;
- ⇒ l'ingénierie des architectures de stockage;
- ⇒ l'évaluation des performances du stockage géologique profond.



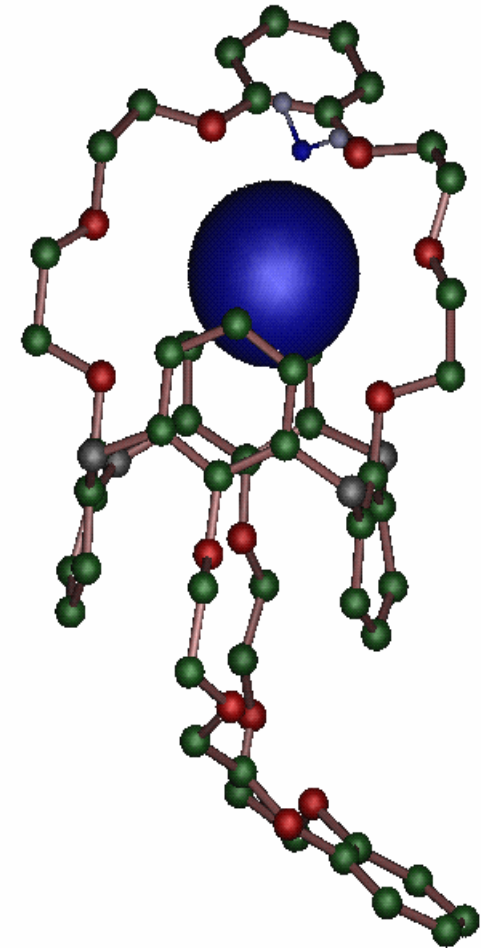
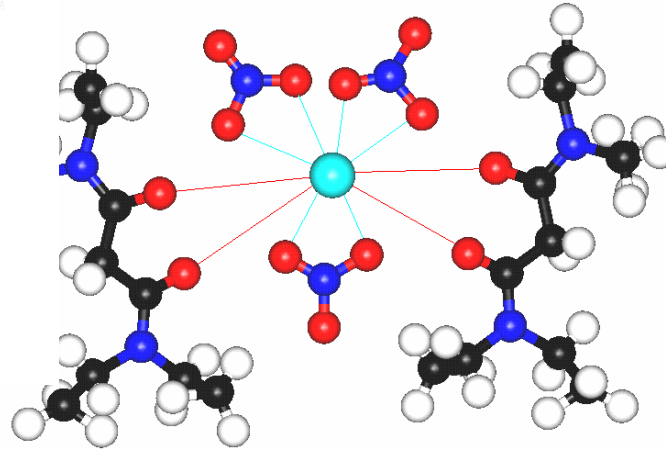
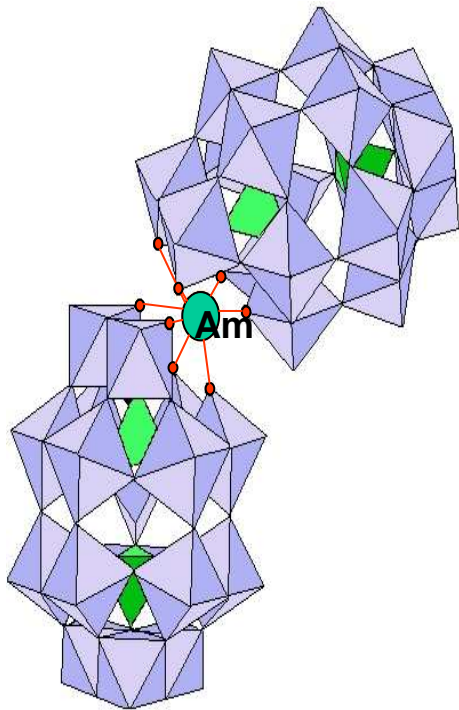
Bure



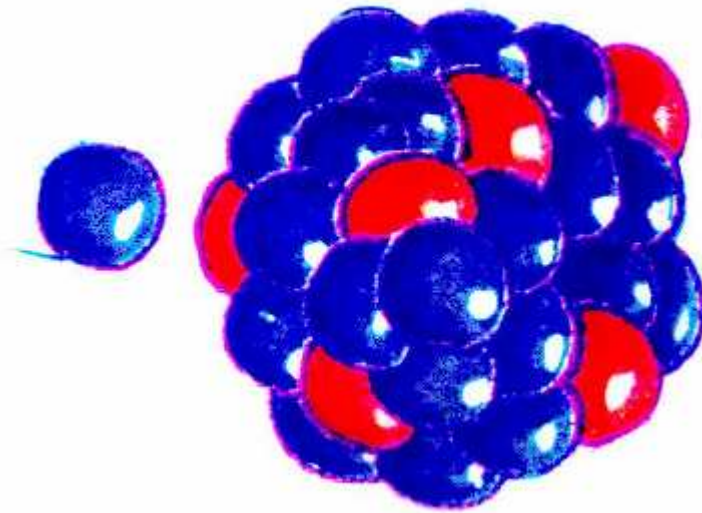
Des molécules extractantes, sélectives et résistantes

pour séparer les éléments à vie longue

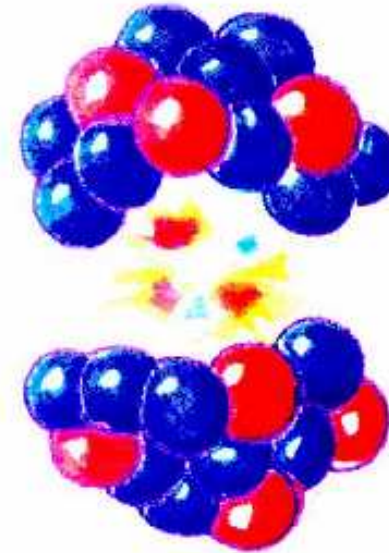
cea



LA TRANSMUTATION



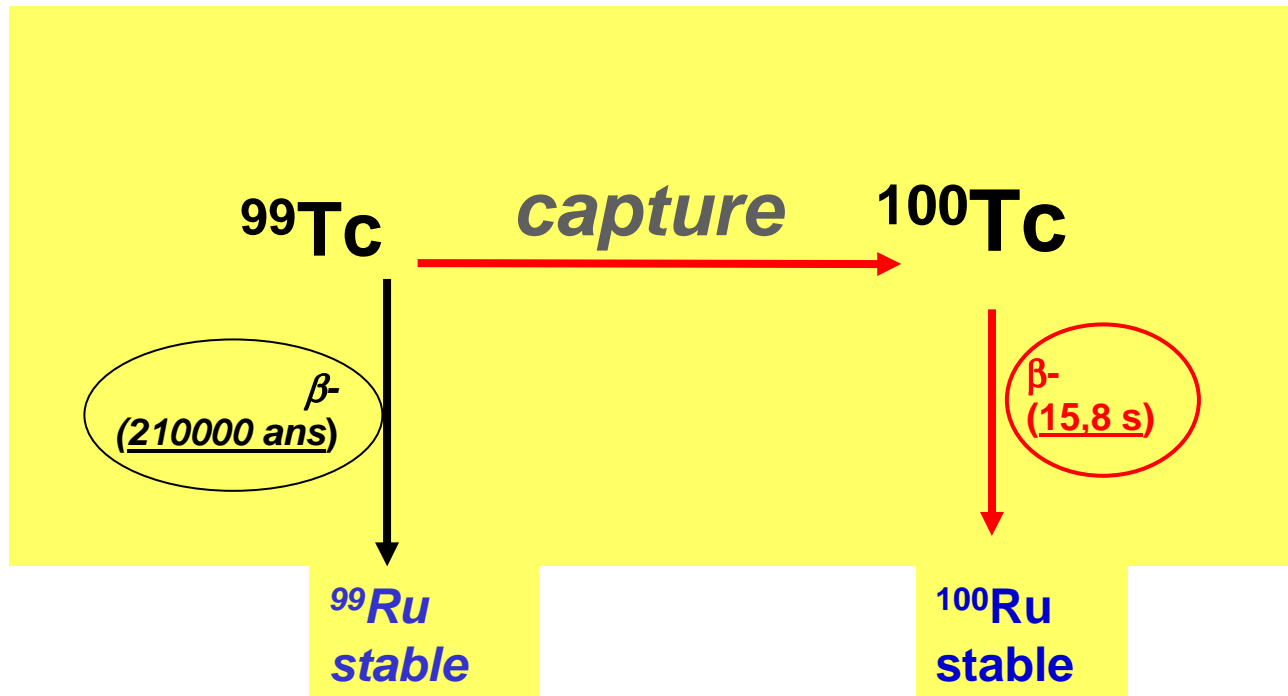
la capture



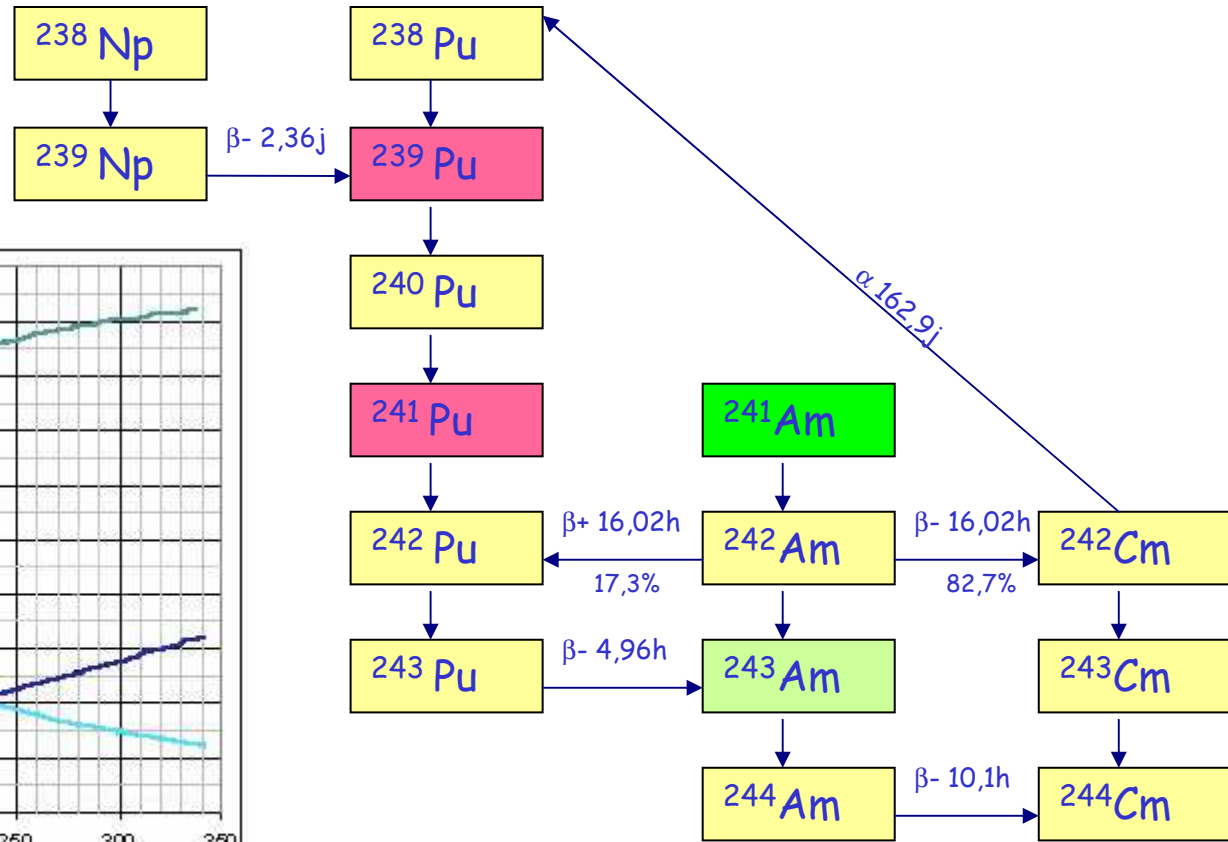
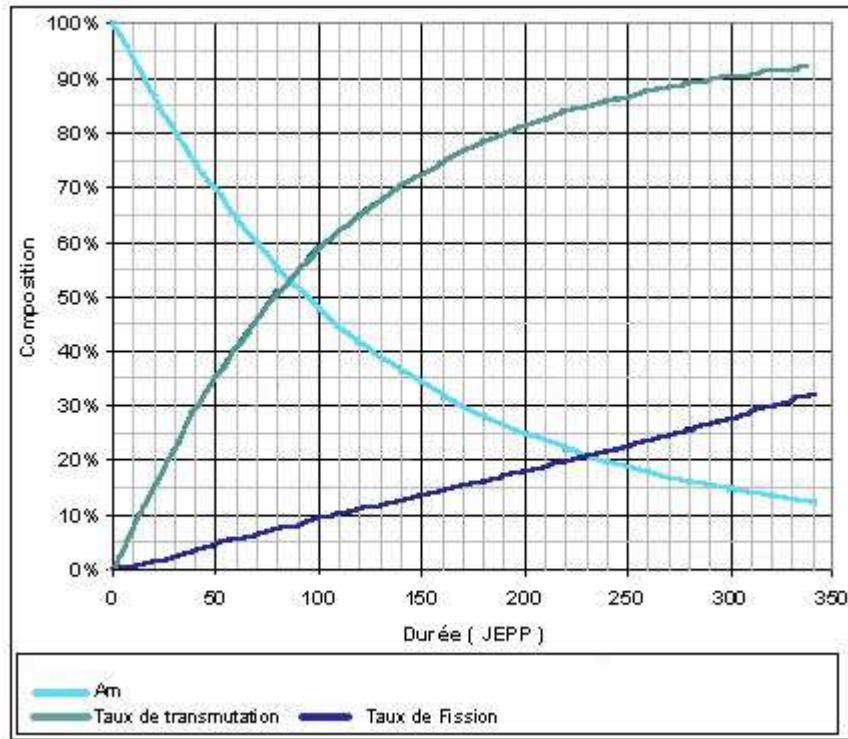
la fission

*des réactions de capture et/ou de fission
pour donner naissance à de nouveaux éléments*

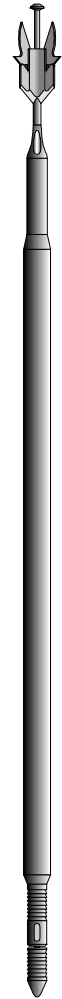
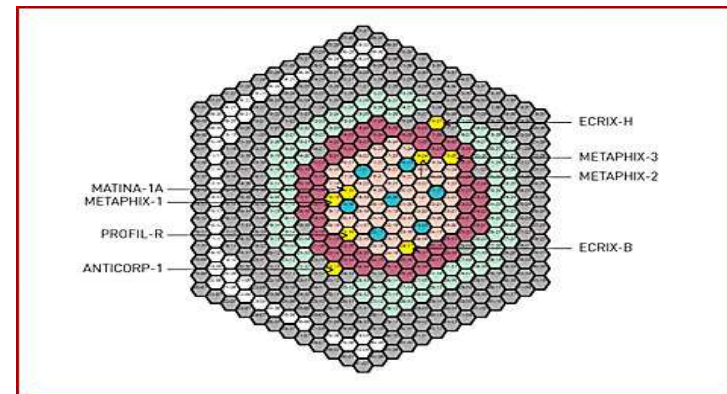
Un exemple: la transmutation du TECHNETIUM



TRANSMUTATION : *le cas des actinides*



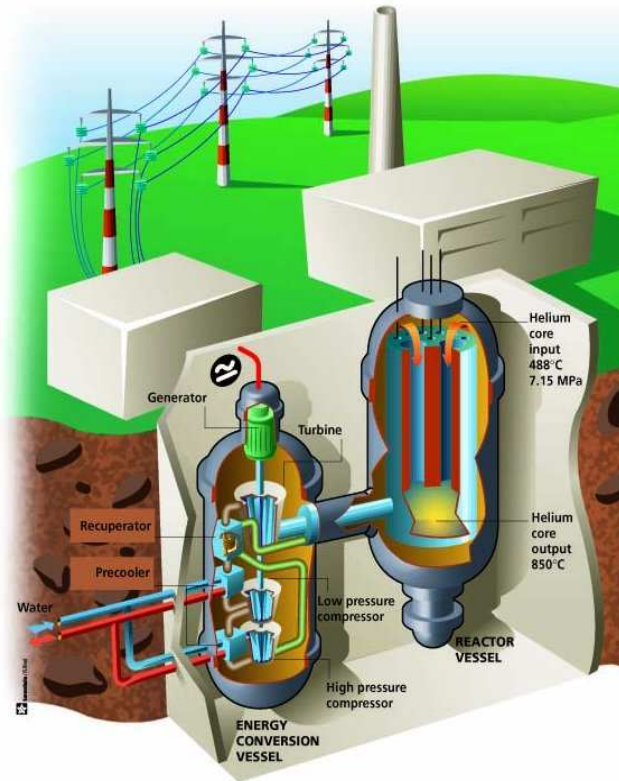
Expériences de transmutation dans Phénix



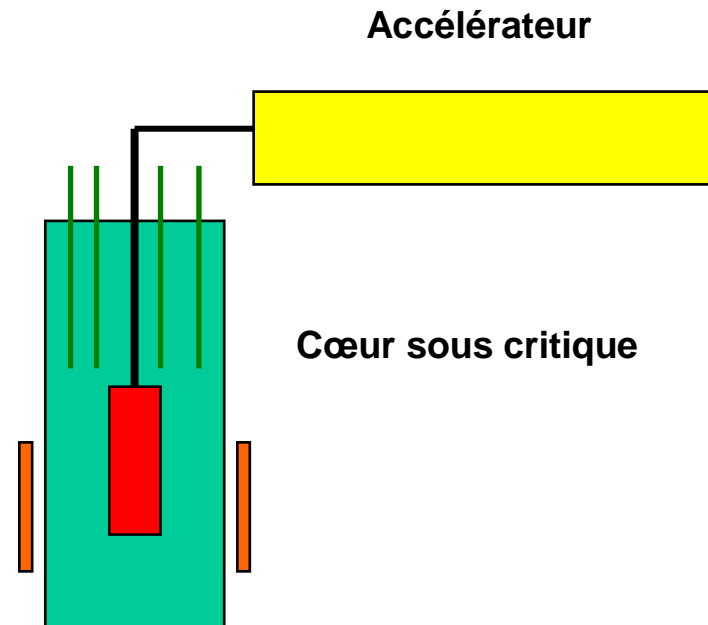
Transmutation : *quels dispositifs ?*



En réacteurs électrogènes



En réacteurs dédiés



le 28 juin 2006 : une nouvelle loi votée...

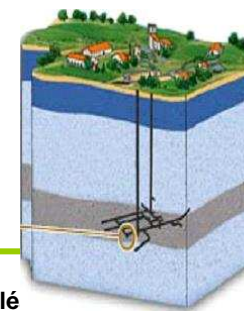


retraitement et recyclage

*pour diminuer volume et toxicité des déchets
évaluer perspectives transmutation, proto 2020*

un stockage géologique (réversible)

pour les déchets ultimes , à l'horizon 2025



L'ETUDE de PHILIPPE D'IRIBARNE

 Le jugement du public s'élabore pour une large part à l'aune de critères autres que scientifiques ou techniques.

(« sagesse des nations », et pas obscurantisme)

- Un discours scientifique qui prend à revers les représentations ou les principes qui fondent l'opinion du public est discrédité.

« On ne peut prétendre adresser l'éternité »

QUELLES ATTENTES ?



- des solutions **radicales** (*la transmutation*) pour ramener le problème des déchets nucléaires à **des horizons de temps jugés « accessibles à l'humain »**.
- ou alors des solutions **réversibles**, permettant le jour venu de bénéficier de solutions aujourd'hui non disponibles (*ou même non entrevues ?*).

Systemes nucléaires futurs : les défis



1/ ECONOMIE

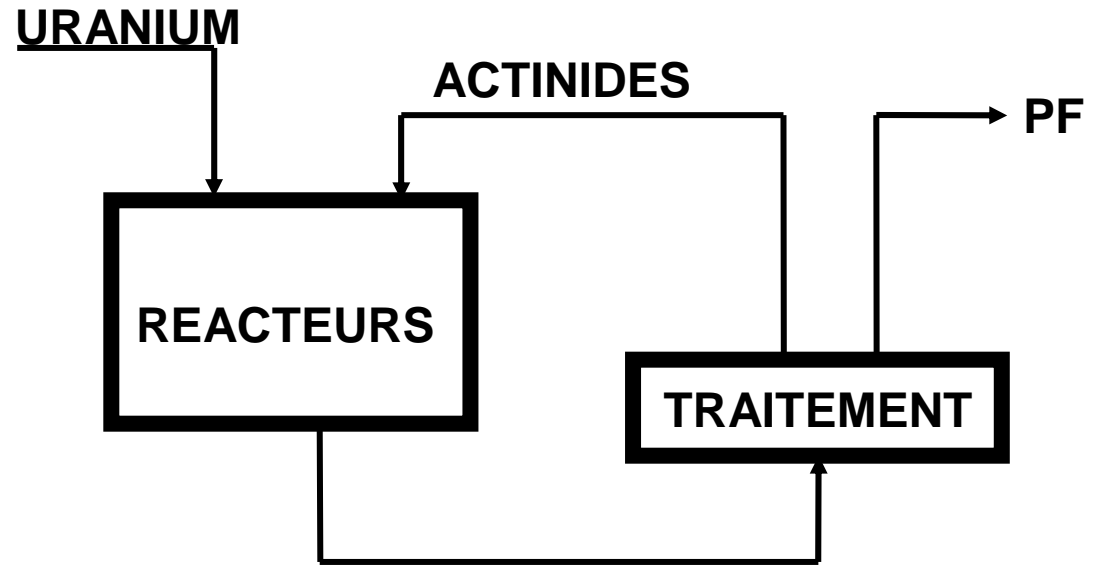
2/ SURETE

3/ « DURABILITE »

- préservation des ressources naturelles*
- minimisation de l'impact des déchets ultimes*
- résistance / risques de prolifération*

Le recyclage, élément-clé pour des options nucléaires durables!

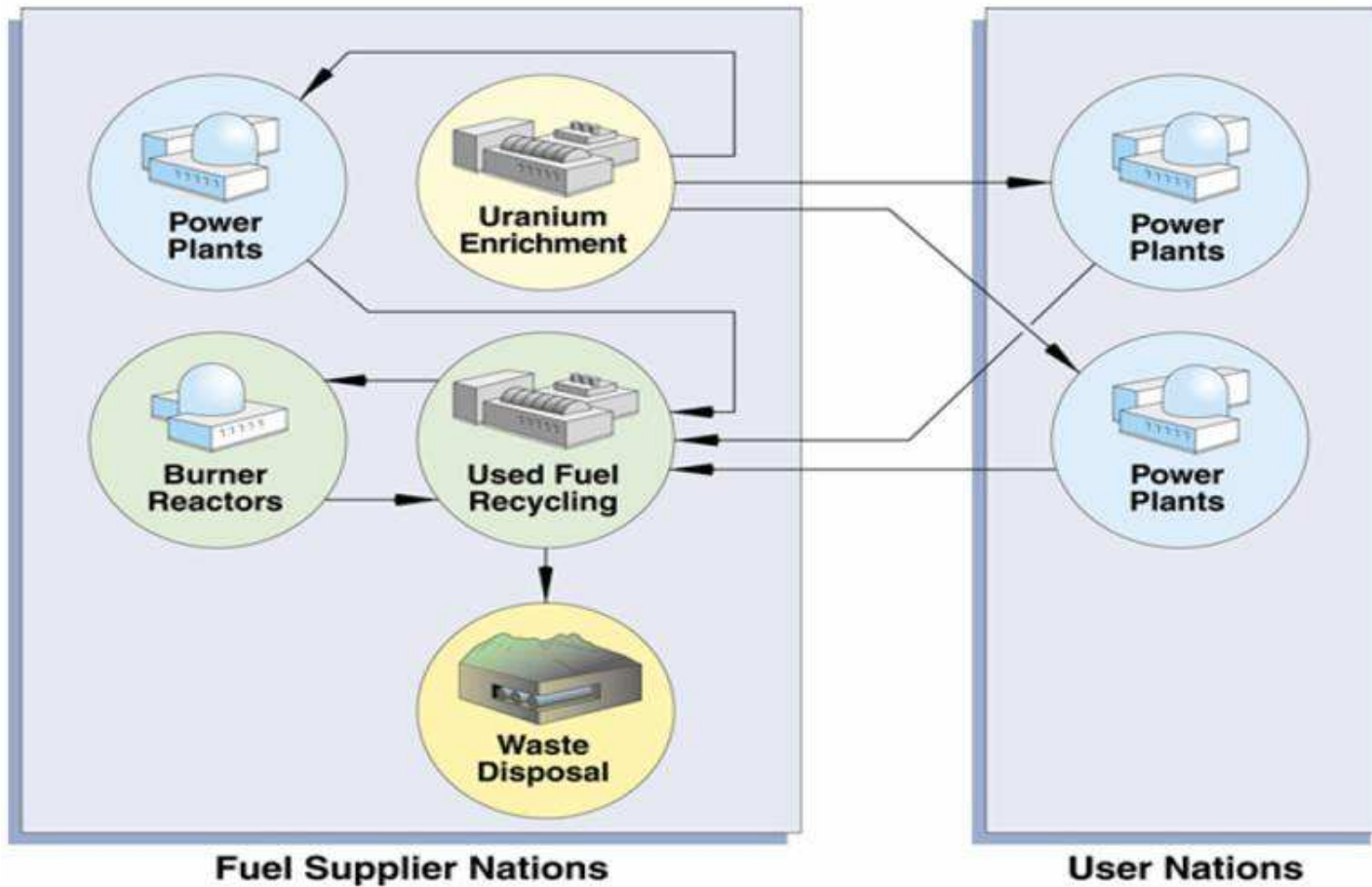
Recycler ...dans des réacteurs à neutrons rapides ?



Réacteurs à neutrons rapides: (sans modérateur):

- valorisent efficacement ^{238}U
(iso- voire surgénération)
- réduisent actinides supérieurs à vie longue
(privilégient fission vs. capture)

L'INITIATIVE AMERICAINE GNEP



EN RESUME...



- **l'énergie, des enjeux considérables!**
- **l'énergie nucléaire: une contribution possible, avec ses atouts et ses détriments ...et un potentiel de progrès !**
- **des solutions durables : avec recyclage poussé (dans des réacteurs qui en tirent parti...)**
- **des défis pour les chercheurs!**