



## Réacteurs sont naturels !

**OKLO (GABON) 2 milliards d'années**

**Comment?**

**Riche dépôt de minerai d' Uranium**

**ET**

**$^{235}\text{U}$  3,7% au lieu de 0,7 % aujourd'hui**

**Seuil de Criticité atteint pour 17 réacteurs avec l'eau pour modérateur donnant ~ 20kW chacun pendant millions d'années.**

**Résultat: 5 tonnes de Produits de Fission  
1,5 tonne de PLUTONIUM et d' ACTINIDES**

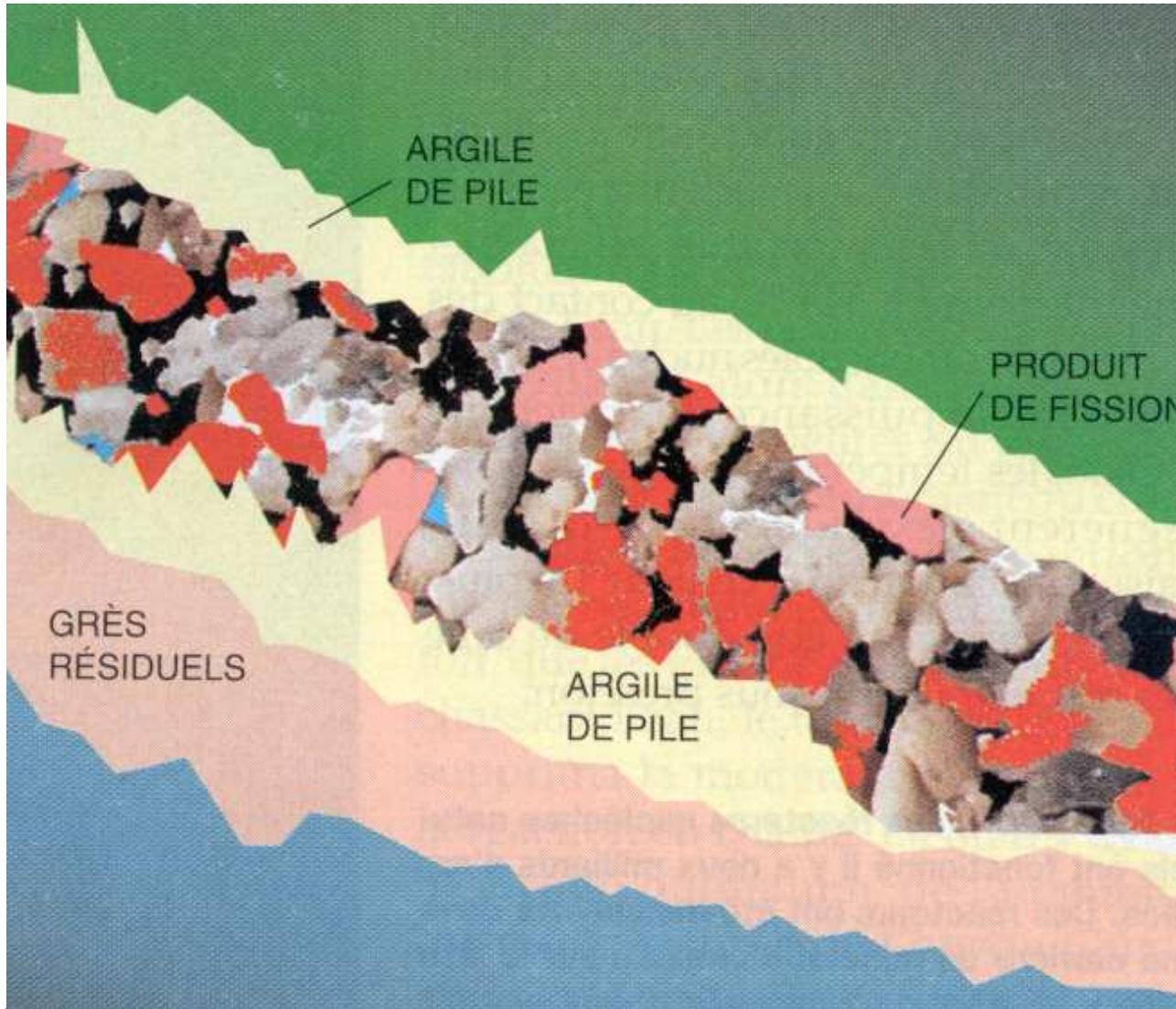
**Parfois utilisé dans l'argumentation du stockage des Actinides qui n'ont pas migré de manière significative à partir du site.**

# OKLO: Oxyde d'Uranium + eau après dissolution de la silice



(c) Maurice Leroi, FRS-Strasbourg, 2007  
Gris: SILICE Rouge: OXYDE d'URANIUM 3  
droits réservés

# OKLO: Après dégradation du grès

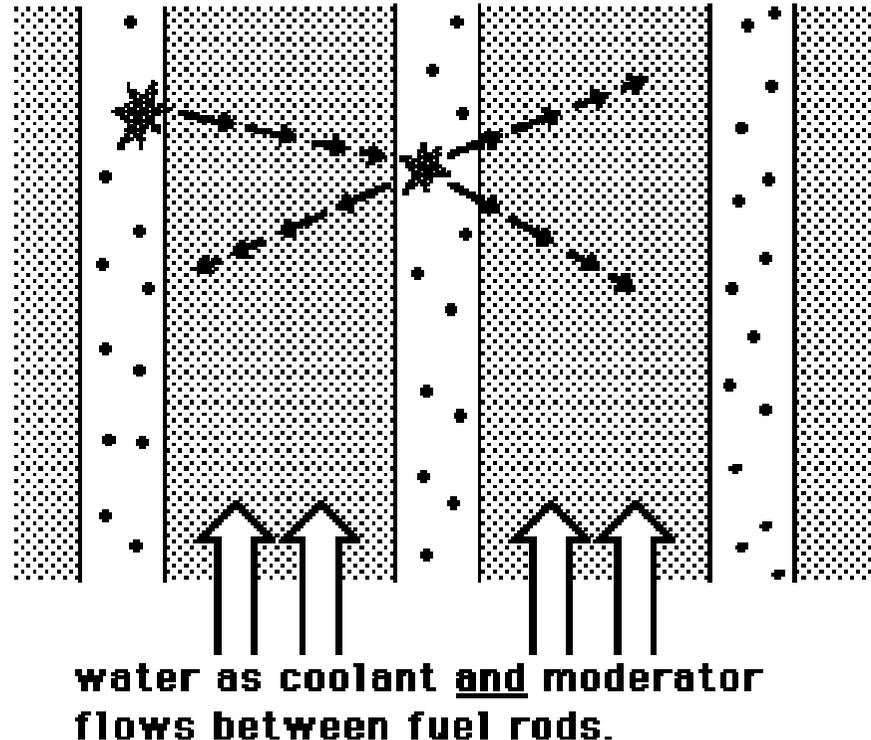


(c) Maurice Leroy - Tous droits réservés

APR-Strasbourg - 21 avril 2000

# MODERATION

**Neutrons** de la **fission** ont de très grandes vitesses et être énormément ralentis par l'eau de "modération" pour maintenir la **réaction en chaîne**. L'uranium-235 est **enrichi à 2.5 - 3.5%** ce qui permet à l'eau ordinaire d'être modérateur.



La perte de l'eau de refroidissement tue la réaction en chaîne puisque la configuration du combustible n'est pas "**critique**" en elle-même.

# BARRES DE CONTROLE

**Absorbeurs de neutrons**

**Cadmium**

**Hafnium**

**Boron**

**Pour secondaire: solution de sel de Gadolinium**

## MODERATEURS

**Pour ralentir des neutrons**

**Eau**

**Eau lourde**

**Graphite**

# CENTRALE NUCLEAIRE

- Combustible irradié
  - Actinides, Fission, Produits d'Activation

## Radionucléides du Combustible (in Kg)

Isotope	Départ	Irradié	$\Delta$
$^{235}\text{U}$	33	7.9	-25.1
$^{236}\text{U}$	0	4.0	4
$^{238}\text{U}$	967	942.9	-24.1
$^{237}\text{Np}$	0	0.75	0.75
Am, Cm	0	0.2	0.2
Pu	0	9.05	9.05
FP	0	35.1	35.1

# ***REP***

**ZIRCALLOY: 98% Zr + Sn, Fe, Cr... pour améliorer les propriétés mécaniques**

**Pastille de combustible: disque d'oxyde d'U enrichi en  $^{235}\text{U}$  (2 à 5%)**

**Aiguille: Tube ~ 3.5 mètres remplis avec des pastilles**

**Assemblage: 200-300 aiguilles arrangées verticalement dans le coeur du REP**

**Charge d'un REP: 150-250 assemblages ~ 80 to 100 tonnes d'Uranium**

**Rechargement: 1/3 tous les deux ans**

# COMBUSTIBLE MOX

Créer pour

**“UTILISER”**

**“BRULER” Plutonium**

Quantité de Pu dans le combustible est limitée à 10% pour des raisons de sûreté car cela peut modifier:

**LES COEFFICIENTS DE REACTIVITE DU COEUR**

**COMPORTEMENT DU COMBUSTIBLE SOUS IRRADIATION**

Dans un REP-900 coeur: 70% UOX + 30% MOX

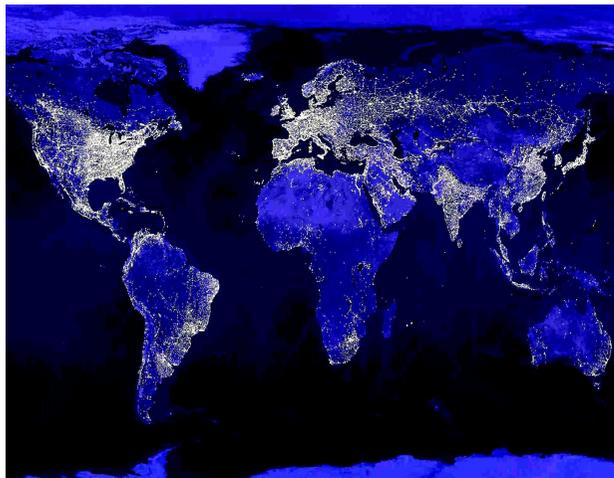
# ENERGIE : *UN PROBLEME PLANETAIRE*

## !

- 10 Gtep/an for 6 milliards d'habitants
- 75 % combustibles fossiles (*pétrole – gaz – charbon*)
- C'est évidemment *non durable* !
  - ⇒ *raréfaction des ressources naturelles;*
  - ⇒ *Craintes concernant le possible changement de climat;*
  - ⇒ *Distribution planétaire très hétérogène!*

# CONSOMMATION D'ENERGIE

([www.iea.org](http://www.iea.org))



	POPULATION ( <i>millions</i> )	2000 ( <i>tep/hô/an</i> )
U.E.	380	4
AMERIQUE NORD	410	7
RUSSIE	150	4
CHINE	1200	0.9
INDE	1000	0.4
AFRIQUE	800	0.4
<b>MONDE</b>	<b>6 milliards</b>	<b>1.6</b>

# ENERGIE DE DEMAIN : *TENDANCES POSSIBLES*

⇒ ECONOMIES D'ENERGIE

⇒ PLUS DE « RENOUVENABLE »

⇒ PLUS D'ENERGIE NUCLEAIRE ?

*electricité*

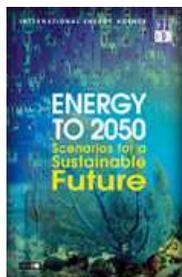
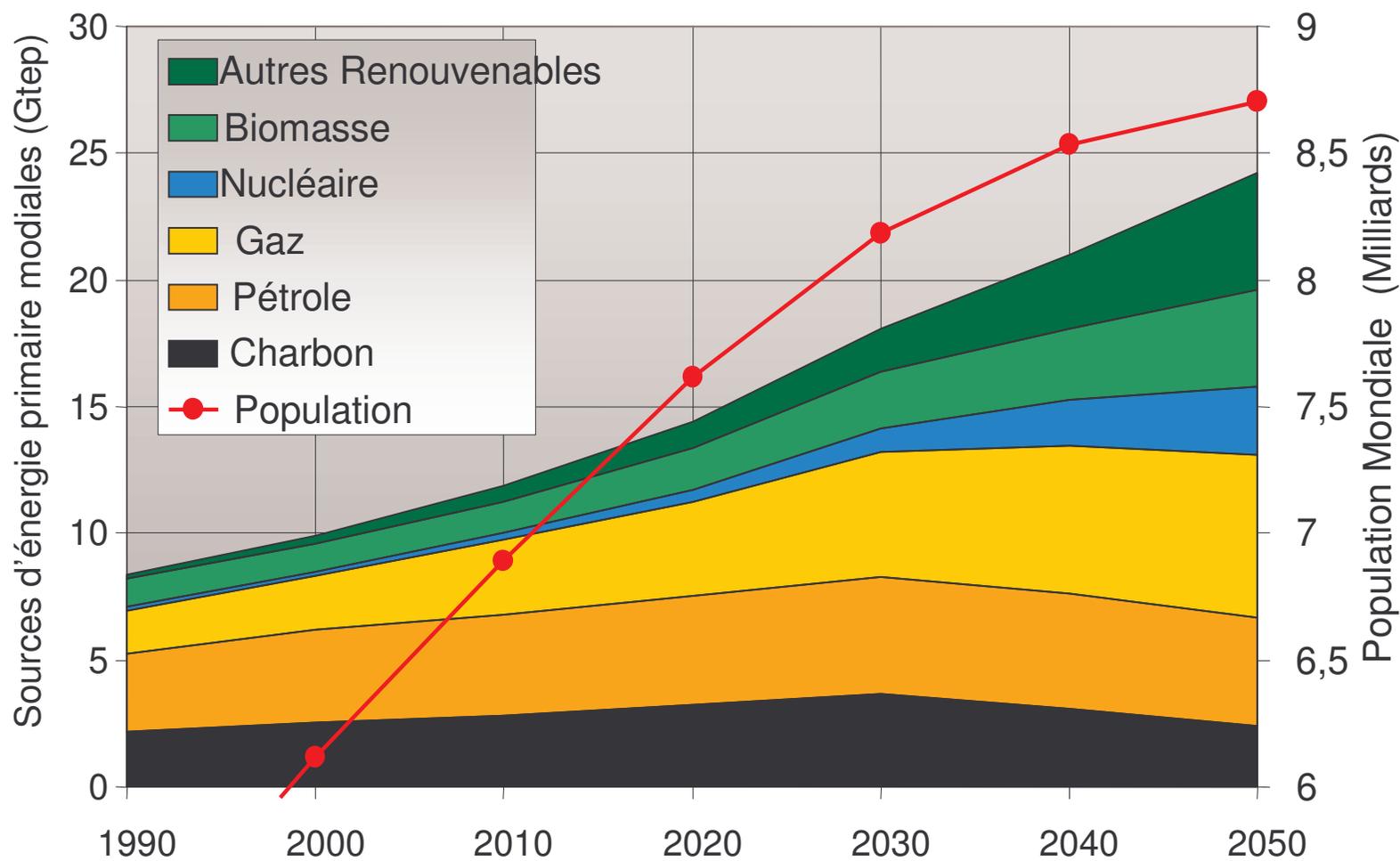
*autres : chaleur*

*dessalinisation*

*production hydrogène*

...

# BESOINS EN ENERGIE



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

# ENERGIE NUCLEAIRE: *LE CAS FRANCAIS*

- 58 REP
- 80 % production d'électricité ( 300 TWh /y)
- *Un cycle du combustible « fermé » :*
  - Retraitement du combustible;
  - U recyclé (CRUAS 1&2) ;
  - Pu recyclé (20 LWR chargés avec du MOX )
- *Devenir ultime des déchets :*
  - 1991 LOI : recherche avant décision ;
  - décision : 2006

CO<sub>2</sub> émissions Tonnes  
per capita à partir de  
combustibles fossiles

Country	1972	1980	1990	1998
D	13,01	13,85	12,38	10,45
A	7,21	7,85	7,70	7,63
B	13,53	12,92	10,97	12,00
DK	12,24	12,24	10,36	10,81
E	3,67	5,23	5,56	6,45
FIN	9,46	12,27	10,77	11,59
F	8,99	9,01	6,66	6,38
GR	3,49	5,03	7,13	7,86
IRL	7,63	7,95	9,49	10,36
I	5,97	6,67	7,21	7,48
L	44,97	33,57	28,43	16,85
NL	10,94	11,23	10,80	10,92
P	1,85	2,62	4,20	5,45
UK	11,43	10,54	10,15	9,28
S	10,61	8,80	6,16	6,05
<b>EU</b>	<b>9,25</b>	<b>9,54</b>	<b>8,83</b>	<b>8,47</b>
<b>USA</b>	21,47	20,98	19,64	20,10
<b>CDN</b>	16,59	17,67	15,51	15,75
<b>J</b>	7,60	7,85	8,62	8,92

Source : Energy Handbook - CFA 2002  
AIDCO March 10, 03  
droits réservés

## Production Française d'Electricité

2001	Hydro	Nuclear	Thermal + Wind	Export	Total
TWh	79,3	401,3	46,1	68,4	595,1

Annuellement la France reçoit 700 000 TWh à partir du soleil !

## Exportation

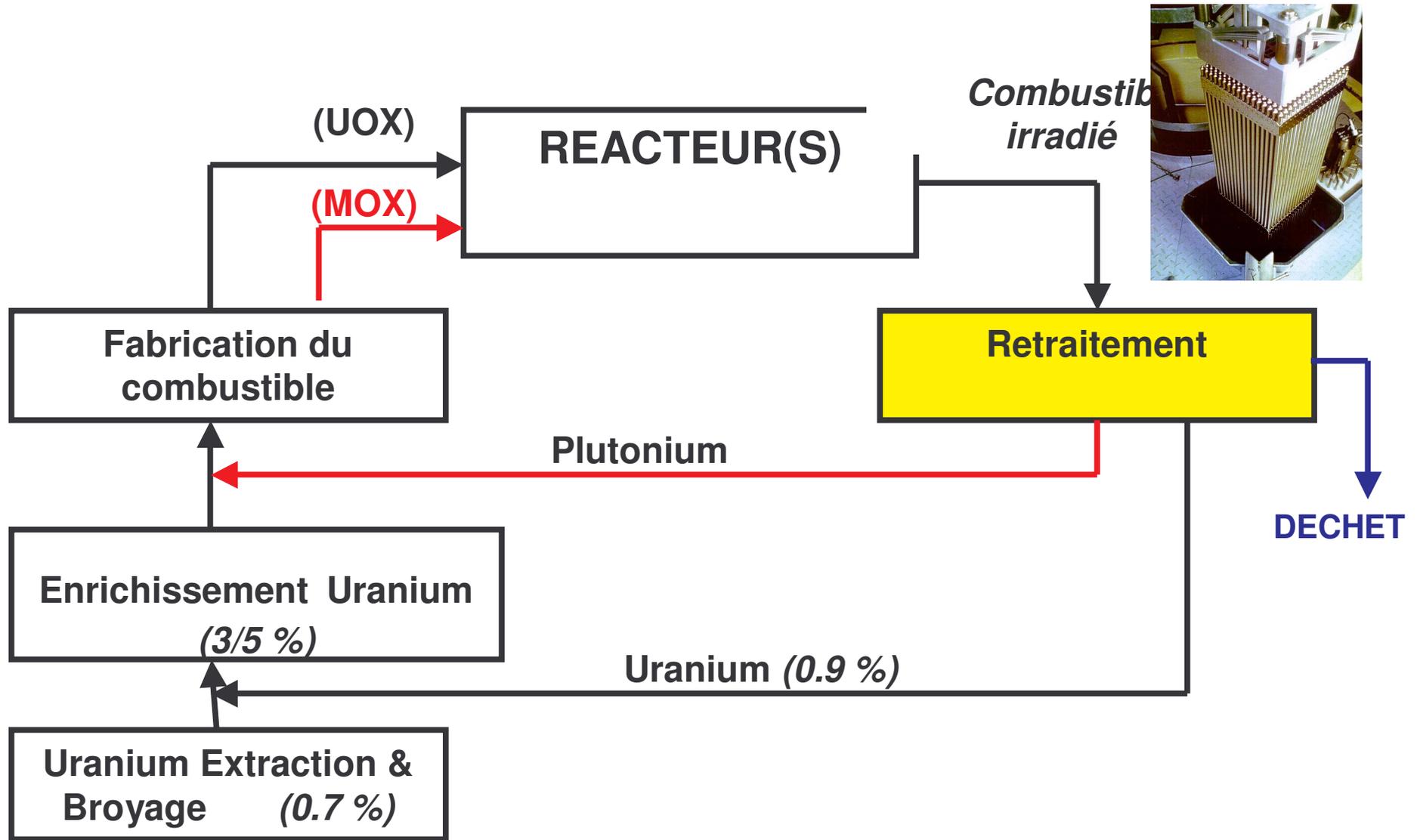
	IT	D	UK	CH	ES	B	AND	TOTAL
TWh	17,7	14,2	11,4	8,1	5,5	11,5	0,1	68,4
%	25,9	20,8	16,7	11,8	8,0	16,8	0,0	100

**TW = Terawatt =  $10^{12}$  watts**

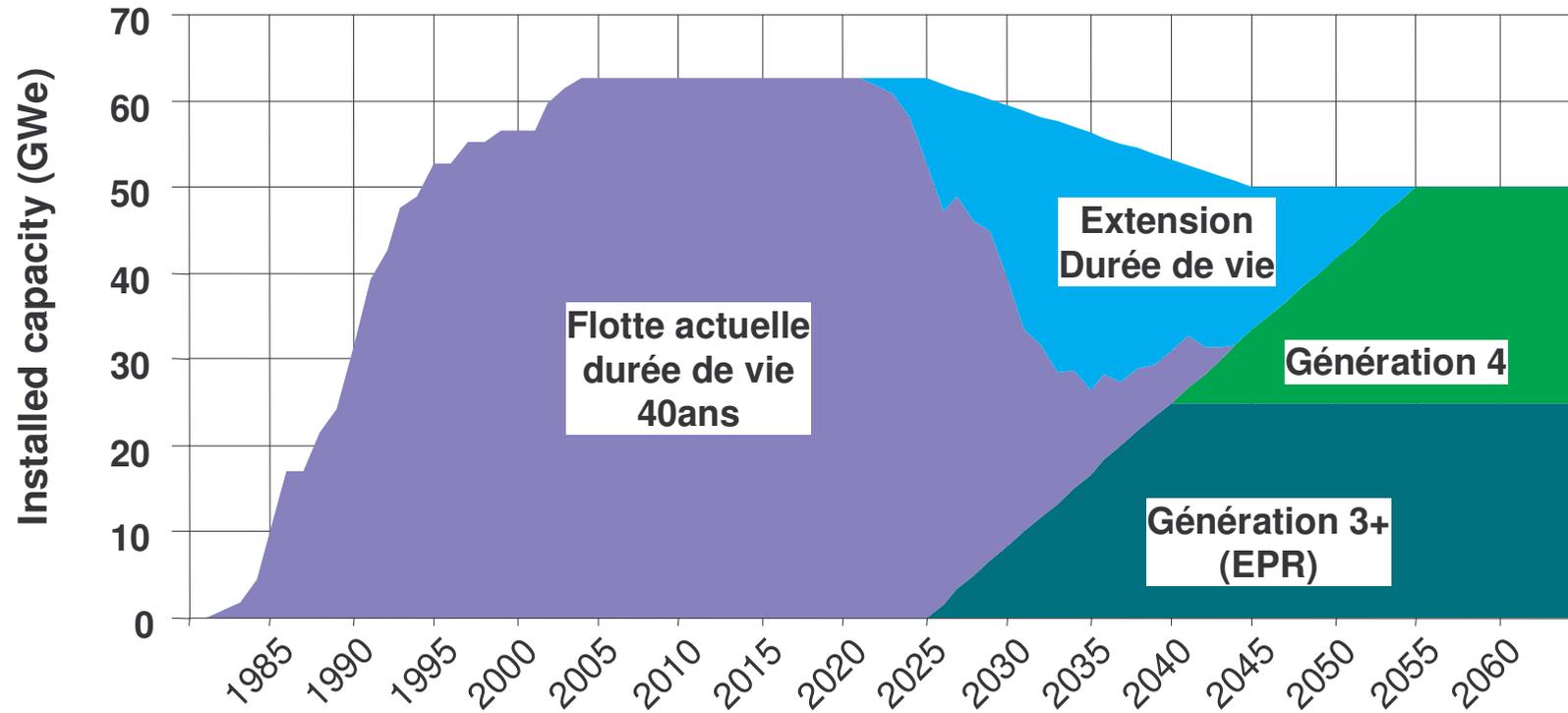
(c) Maurice Leroy - Tous  
droits réservés

APR-Strasbourg - 21 avril 2006

# COMBUSTIBLE RETRAITEMENT ET RECYCLAGE



# PARC NUCLEAIRE FRANCAIS : *PERSPECTIVES...*



EDF, *ENC 2002*

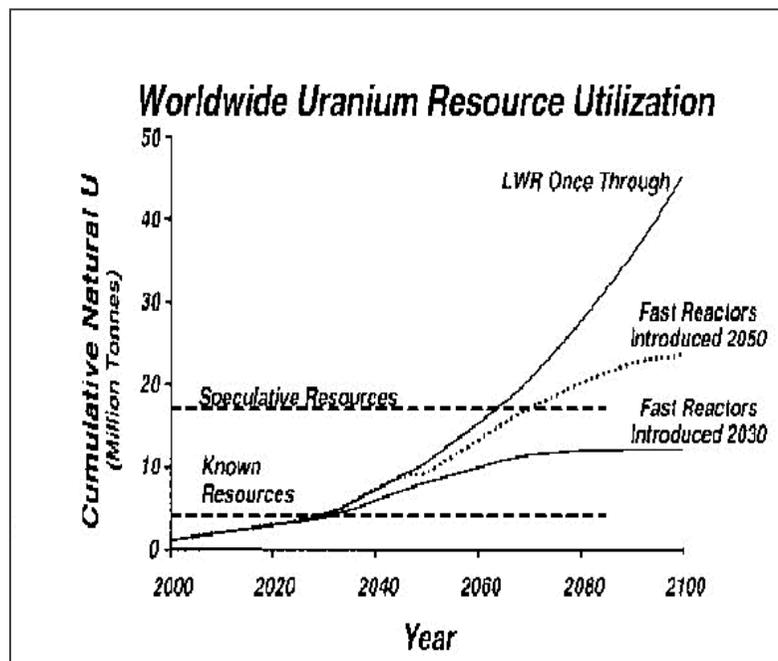
## ENERGIE NUCLEAIRE DANS LE MONDE

- AUJOURD'HUI : 430 centrales nucléaires  
7 % énergie primaire  
16 % électricité (2500 TWh/y)  
10 000 réacteur.ans cumulés.
- ATTRACTIVE !
  - ⇒ prix;
  - ⇒ pas de CO<sub>2</sub>.
- QUESTIONS CLEFS POUR LA DURABILITE :
  - ⇒ sûreté
  - ⇒ gestion des déchets
  - ⇒ problèmes de prolifération
  - ⇒ ressource en uranium

## Production de 1000 MWe

<b>Photovoltaïque</b>	100 km <sup>2</sup> ( Rendement 10%)
<b>Eolienne</b>	6000 Eoliennes (20 m diamètre)
<b>Biomasse</b>	30 000 km <sup>2</sup> forêts
<b>Charbon</b>	2 300 000 T/an
<b>Pétrole</b>	1 900 000 T/an
<b>Fission</b>	150 tonnes uranium / an
<b>Fusion</b>	150 kg Tritium 100 kg Deuterium

# RESSOURCES EN URANIUM...



(DOE, Roadmap Generation IV, december 2002)

- « **connu** » : **4 Mtonnes**
- « **spéculatif** » : **17 Mtonnes**
- **quantité annuelle : 60.000 t**

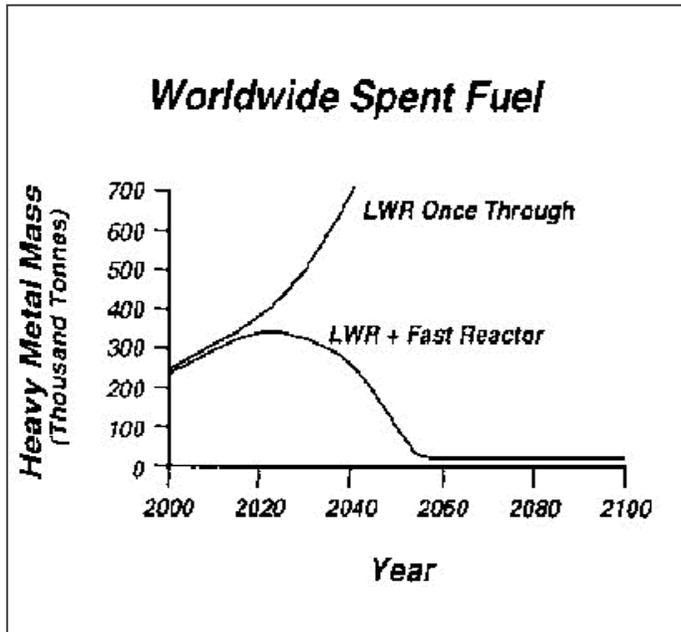
## . RECYCLAGE EN REPs :

- jusqu'à 10 % ressources économisées par recyclage de l'Uranium
- jusqu'à to 15 % ressources économisées par recyclage du Pu

**-mais moins de 1 % de l'uranium naturel subit la fission !**

**. IMPERATIF POUR LE FUTUR : RECYCLER U & Pu DANS DES NOUVEAUX REACTEURS !**

# MINIMISER LES DECHETS...

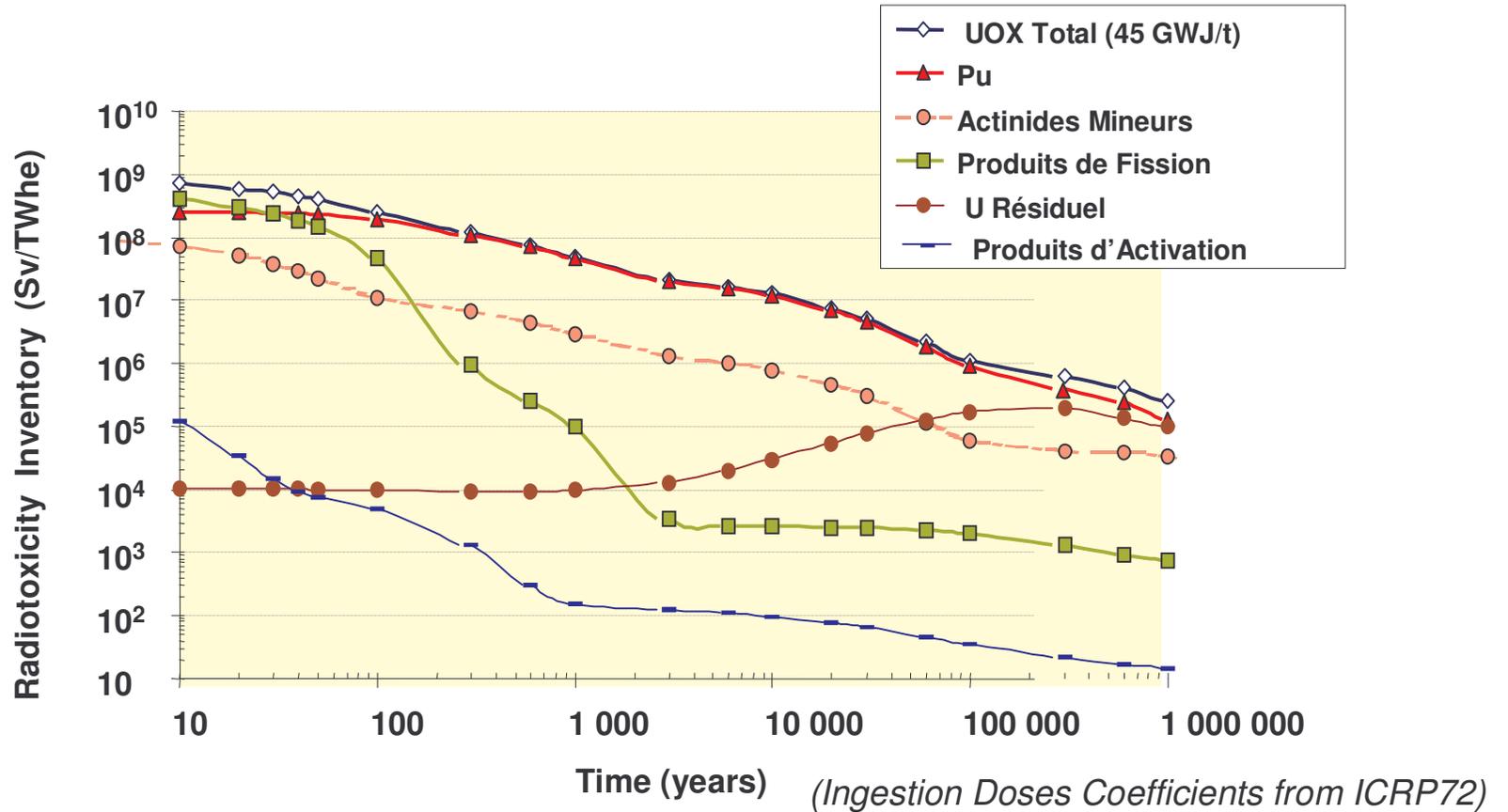


(DOE, Roadmap Generation IV, december 2002)

## Combustible irradié :

- . Uranium : ~ 94 %
- . Plutonium : ~ 1 %
- . An : ~ 0.1 %
- . PF : ~ 5 %

# RADIOTOXICITE A LONG TERME



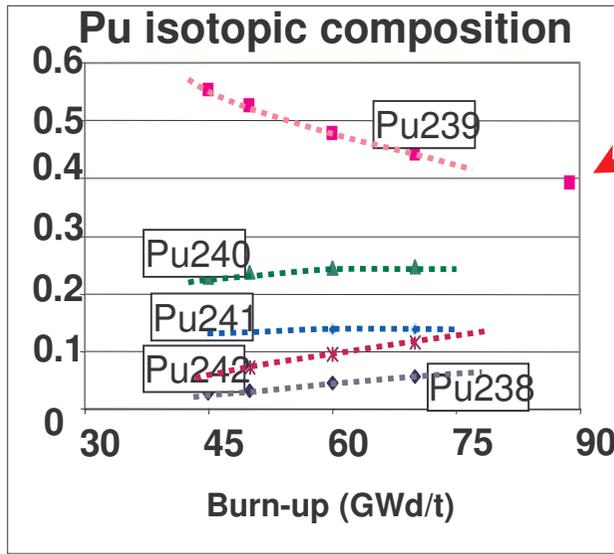
**Principaux contributeurs [1000 – 10.000 ans] : Pu >> An >> FPs**

# GESTION DES ACTINIDES : *DEFIS POUR LA DURABILITE*

- ⇒ (procédés Uranium d'enrichissement de l' Uranium)
- ⇒ Actinide Conception du combustible (\*)
- ⇒ Plutonium EST un combustible (\*)
- ⇒ Consommation des actinides mineurs en réacteurs
- ⇒ Procédés de recyclage (\*) des Actinides
- ⇒ Immobilisation des Actinides

(\*) *DEFIS : chimie des actinides*

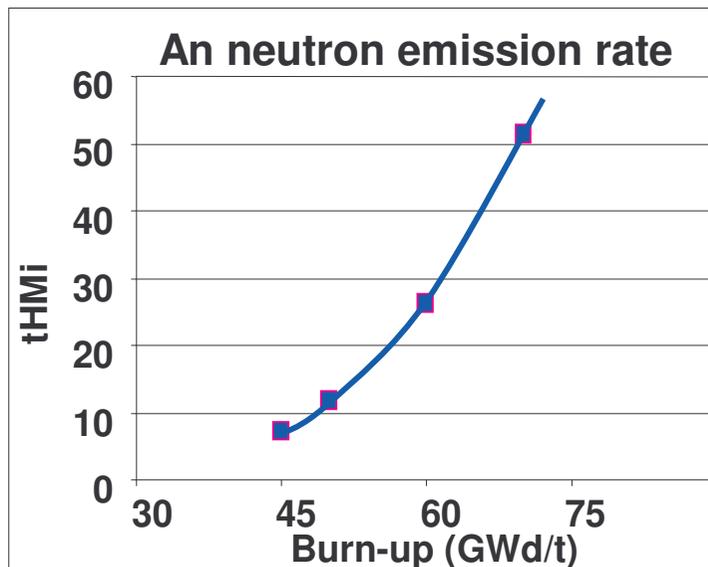
# RISQUES DE PROLIFERATION



MOX  
fuel

## Recycler le plutonium :

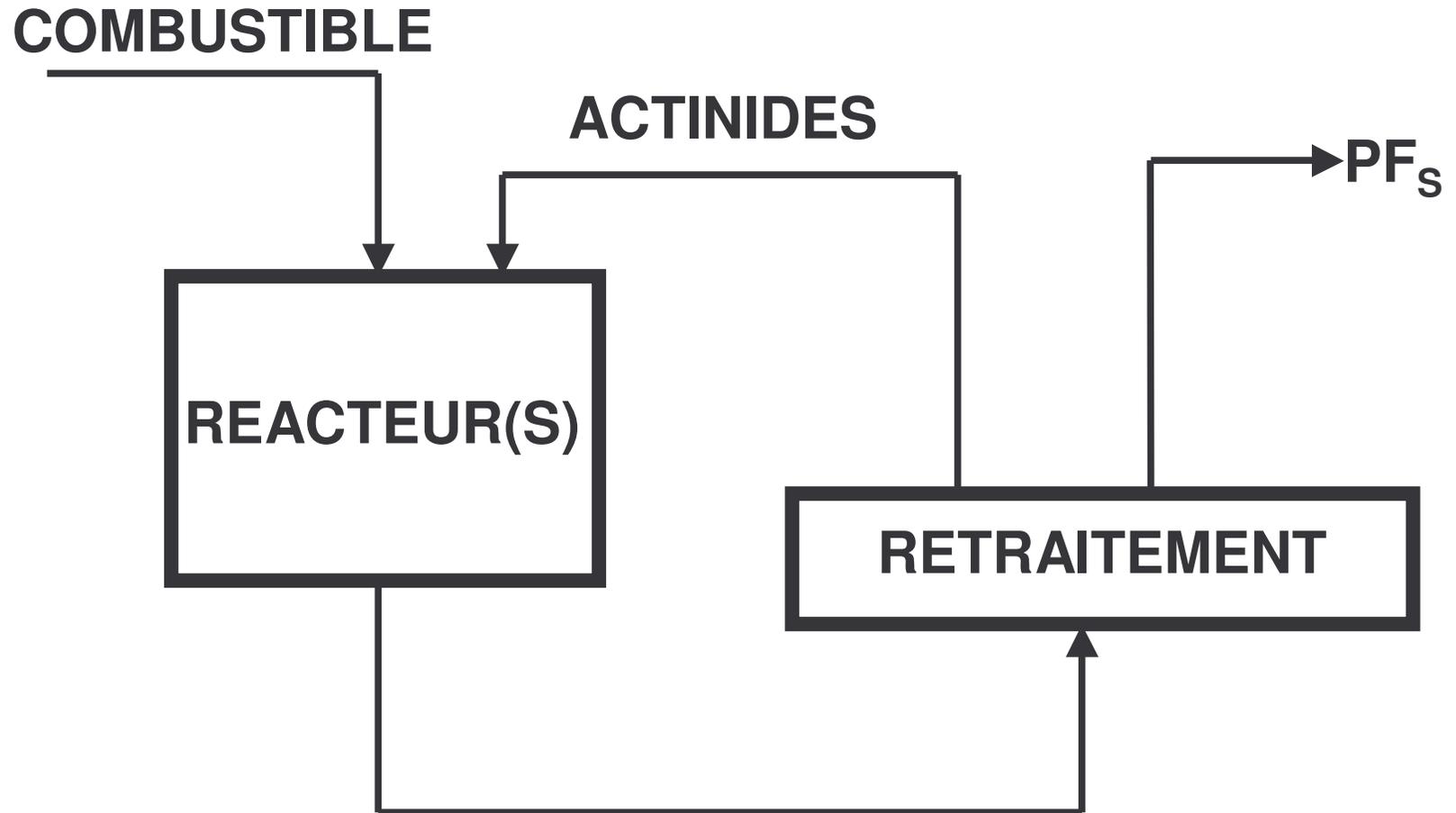
- Diminue sa « valeur stratégique »
- Diminue son « accessibilité » (surtout si Actinides Mineurs presents)



# L'OPTION NUCLEAIRE DURABLE REQUIERT...

- RECYCLER COMBUSTIBLE  
« USE »  
(récupération et ré-utilisation des actinides)
  
- DANS « REACTEURS RAPIDES »  
(Combustible Pu, consommation  $^{238}\text{U}$ )

# DURABILITE, CYCLES DU FUTUR : *PRINCIPE DE BASE*



# LE COMBUSTIBLE GFR : *UN GRAND DEFI !*

- HAUTES TEMPERATURES

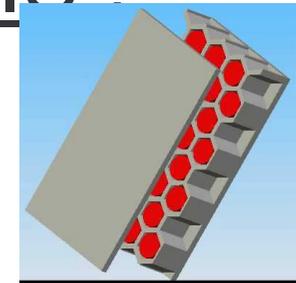
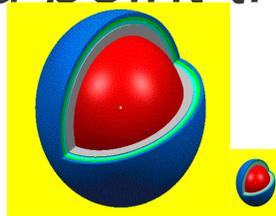
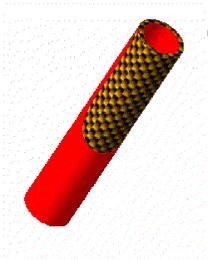
- *nominale*

- *accidentelle* (*inertie thermique la plus faible jusqu'à : 1800 °C*)

- NOUVEAUX CONCEPTS REQUIS !

- *à la fois très petit et très dense;*

- *mise au point très difficile!*



# GESTION DES ACTINIDES : *DEFIS POUR LA DURABILITE*

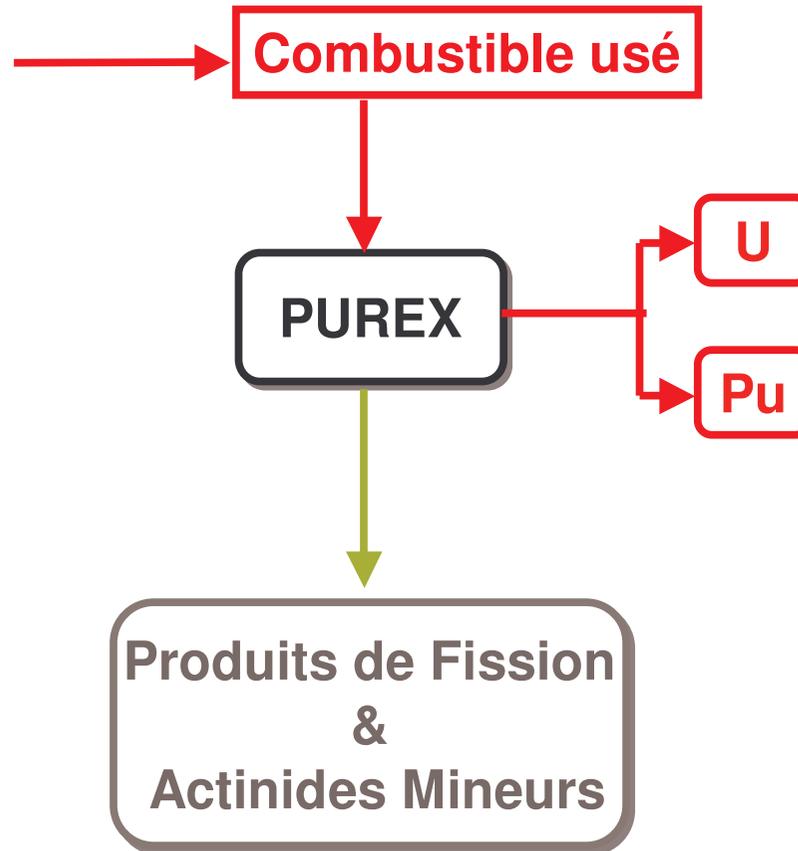
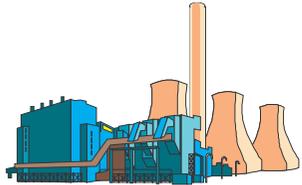
- ⇒ (procédés Uranium d'enrichissement de l' Uranium)
- ⇒ Actinide Conception du combustible (\*)
- ⇒ Plutonium EST un combustible (\*)
- ⇒ Consommation des actinides mineurs en réacteurs
- ⇒ Procédés de recyclage (\*) des Actinides
- ⇒ Immobilisation des Actinides

(\*) *DEFIS : chimie des actinides*

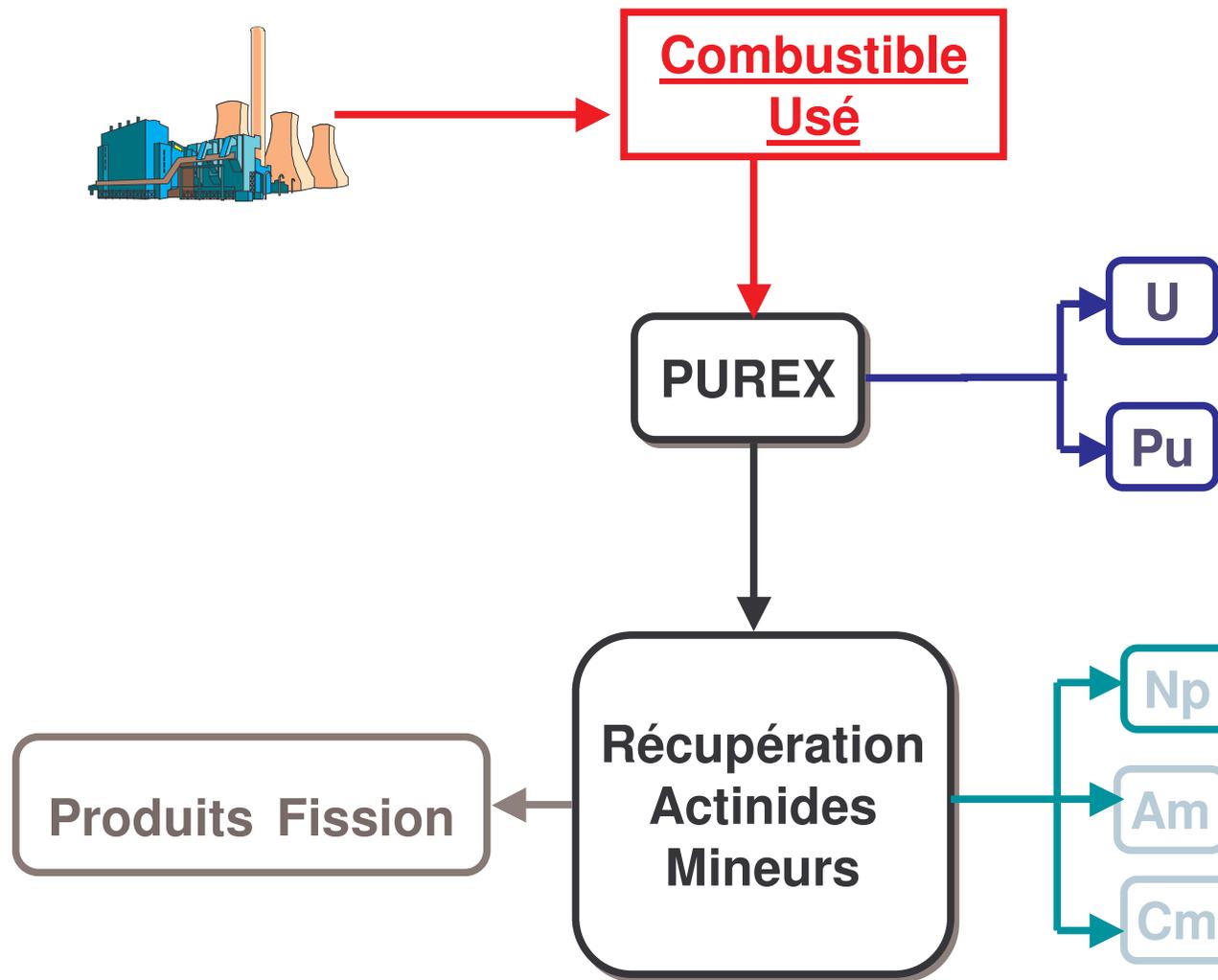
# CHIMIE DES ACTINIDES POUR LES SYSTEMES NUCLEAIRES DU FUTUR

- CHIMIE DES ACTINIDES A L'ETAT SOLIDE (Combustibles, matrices)
- CHIMIE DES ACTINIDES EN SOLUTION (Procédés de séparation, radiotoxicologie, analytique...)
- CHIMIE DES ACTINIDES INTERFACIALE (séparation, dissolution, conversion en composés solides...)

# RETRAITEMENT DU COMBUSTIBLE USE



# VERS UN RECYCLAGE DE TOUS LES ACTINIDES ?



# SEPARATION DES ACTINIDES : COMMENT?

- EXTRACTION par SOLVANT : *la « voie de référence »*

- \* *utilisée aujourd'hui pour le recyclage de U et Pu*

- \* *Excellents rendements de séparation!*
  - \* *Faible volume de déchets technologiques*

- PROCEDES « PYRO » : *l'alternative principale (haute température, sels fondus)*

# ATALANTE CELLULES CHAUDES (mise en service 2003)



(c) Maurice Leroy - Tous droits réservés

APR-Strasbourg - 21 avril 2006

34

# CYCLES FUTURS DU COMBUSTIBLE : *PRINCIPALES TENDANCES*

## (1) RECYCLAGE des ACTINIDES

*[valorisation du contenu fissile/fertile]*

*[quantité, radiotoxicité, impact des déchets]*

## (2) RECYCLAGE des ACTINIDES ENSEMBLES ?

*[simplifier, accroître la résistance à la prolifération]*

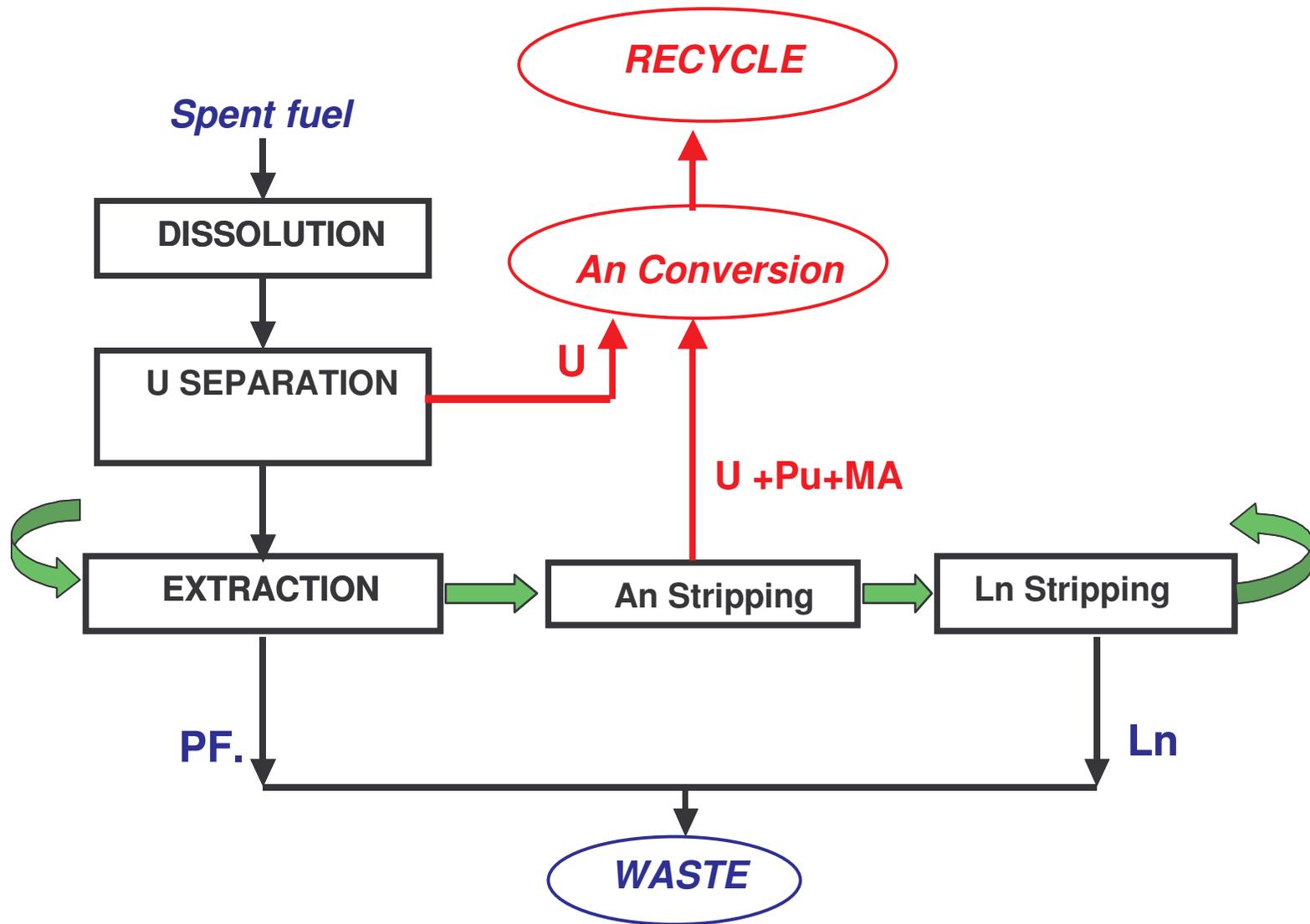
## (3) Une technologie « compacte »

*[diminuer le coût, «recyclage sur site » possible]*

## (4) Une technologie « propre »

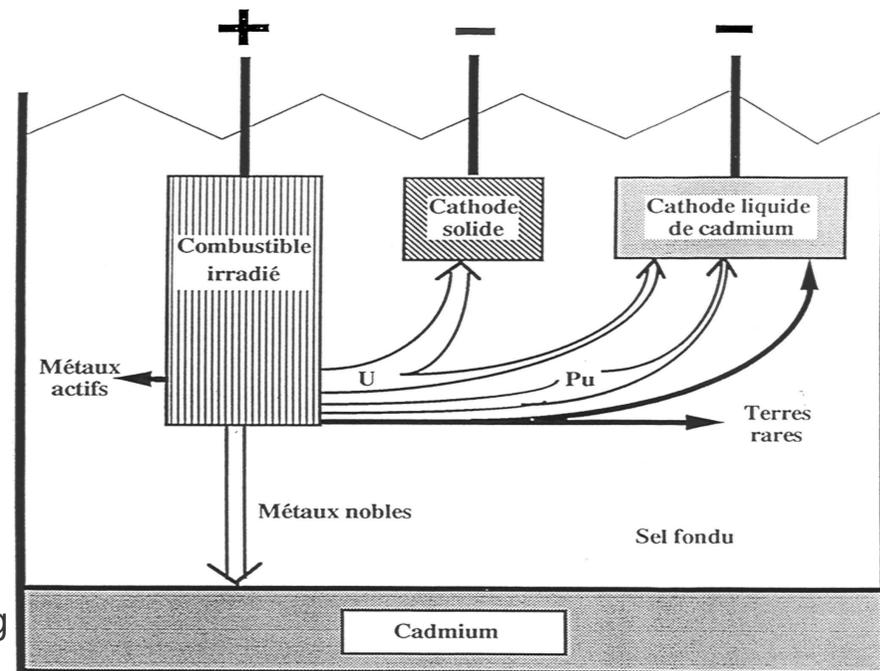
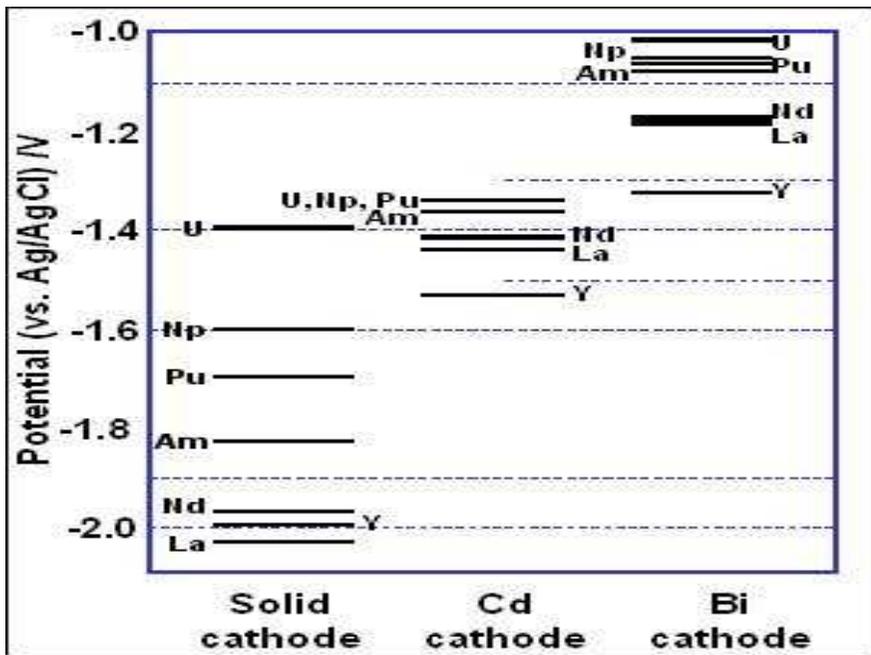
*[limiter déchets technologiques/rejets de radioactivité]*

# ALL-ACTINIDE GROUPED RECOVERY



# PROCEDES « PYRO » : *PRINCIPE*

- (1) Dissolution du combustible dans un **sel fondu** (haute température)
- (2) Récupération *Sélective* des éléments de valeur par des procédés chimiques classiques:
  - *extraction par métaux fondus*
  - *électrochimie*
  - *précipitation*



# PROCEDES « PYRO » : *POURQUOI ?*

## AVANTAGES ATTENDUS :

- (1) *Faibles effets radiolytiques*
- (2) *Propriétés de solvant*
- (3) *Compacité (dans le principe)*
- (4) *Large domaine d'électro-activité*
- (5) *Pas de modérateur de neutrons (risques de criticité diminués)*
- (6) *Si... Combustibles à sels fondus*
- (7) ...

## INCERTITUDES, INCONVENIENTS POTENTIELS :

- (1) *Rendements de récupération et de purification?*
- (2) *Technologie de mise en oeuvre (corrosion, déchets technologiques, ...)*

# CONTENEUR Cogema



(c) Maurice Leroy - Tous  
droits réservés

APR-Strasbourg - 21 avril 2006

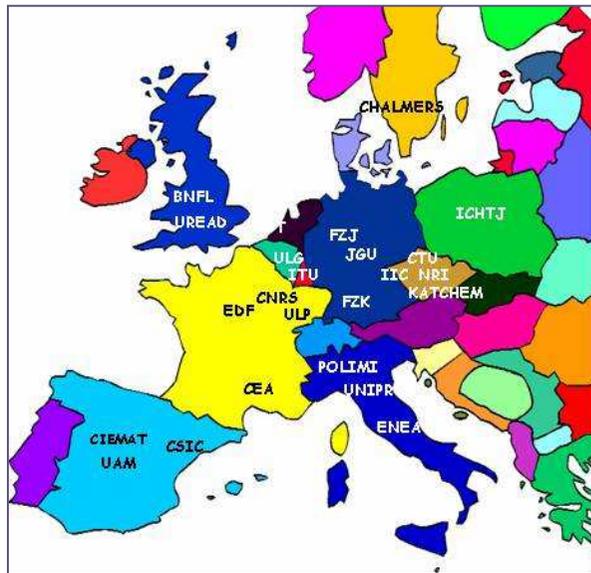
39

# L'INSTALLATION ATALANTE A MARCOULE



# INTERNATIONAL COOPERATIVE FRAMES...

- **ACTINET** for basic research (27 partners)



- **EUROPART** for the design of new extractants for An separation (24 partners)

- **GENERATION IV**, for the shared development of innovative fuel cycles for future nuclear systems



# WHAT ACTINET IS...

ACTINET is a network,

gathering European R&D  
organisations,

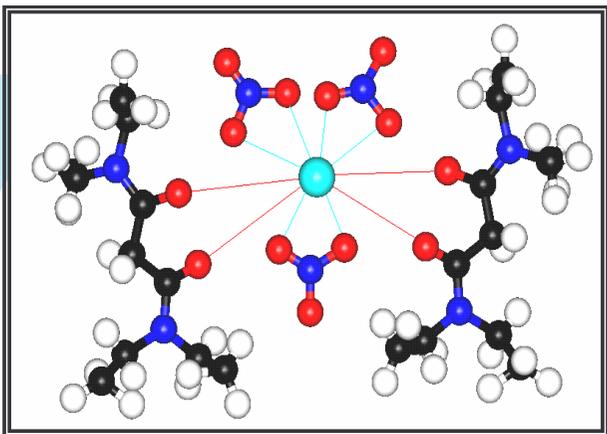
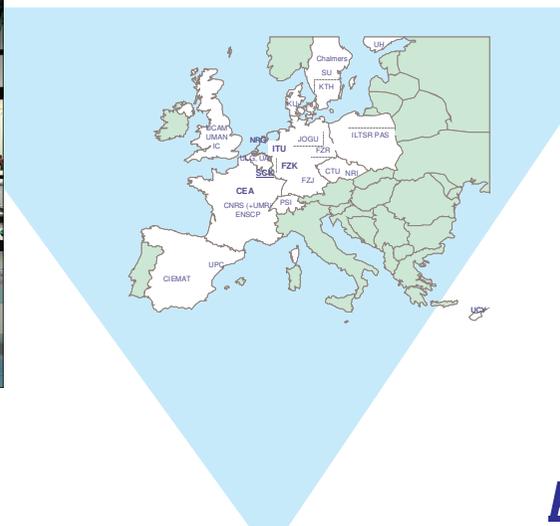
devoted to basic actinide sciences

- launched in March 2004,
- involves ~ 30 R&D organisations from 13 European countries,
- supported by the European Commission within the 6th Framework Programme, as a step toward the “Research Area”
- aims to operate beyond FP6.



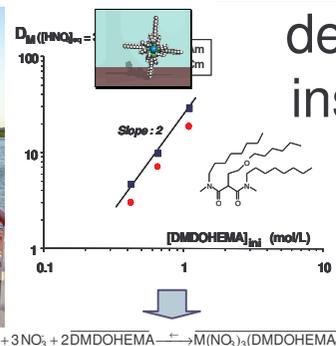


# ACTINET : LES IDEES CLEFS



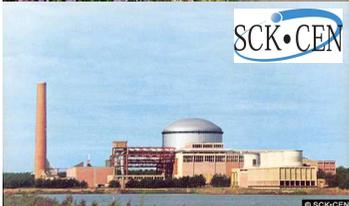
Contribution à des projets communs utilisant de manière optimale les installations disponibles

Création d'un parc d'installations au bénéfice de toute la communauté des sciences des actinides en Europe



## Education et Formation Répandre la connaissance

# LES INSTALLATIONS MISES EN COMMUN



- CEA

- *LN1 Lab in ATALANTE Marcoule (molecular chemistry)*
- *LECA micro analysis area in Cadarache (irradiated fuels)*
- *DPC analytical platform in Saclay (speciation, retention, transport)*
- *LPS nuclear microprobe hot beam line in Saclay*

- FZK-INE

- *Analytical platform and Speciation tools*
- *Active XAFS beam-line (ANKA)*

- ITU

- *Solid state, thermodynamics, thermophysics and radiation damage*
- *Solid-liquid interface chemistry*

- SCK-CEN

- *LHMA (Lab. for High- and Medium-level Activities)*
- *Solid state and radiochemical analysis*

- FZR

- *ROBL XAS beam-line at ESRF*
- *Laser Laboratory at Rossendorf*

- PSI

- *microXAS beam-line at the Swiss Light Source (SLS)*

→ Available to run Joint Research Projects

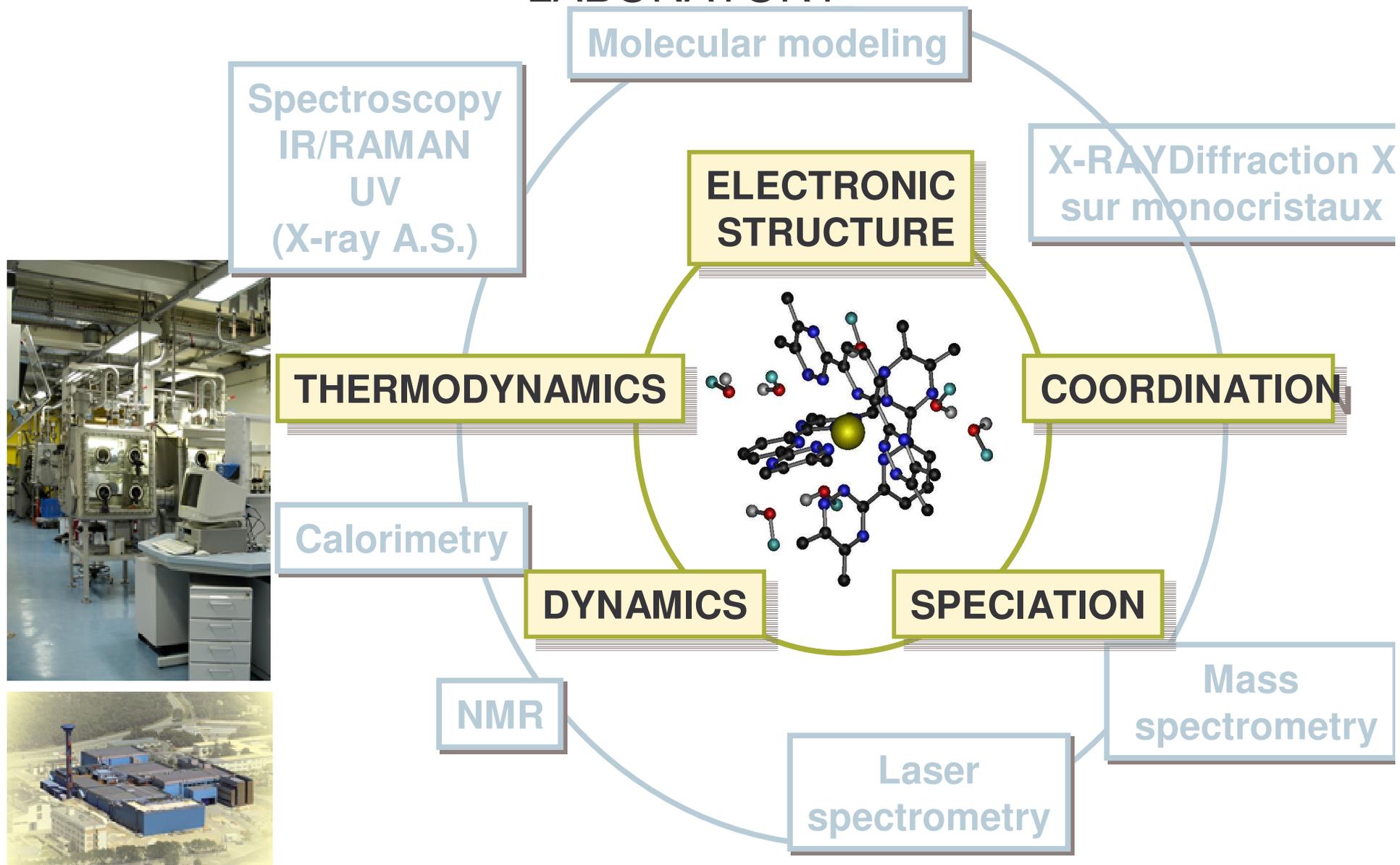
→ Work ongoing to facilitate access (joint certificates...)

details available on <http://www.actinet-network.org>

roy - Tous

APR-Strasbourg - 21 avril 2006

# ATALANTE- « ACTINIDE MOLECULAR CHEMISTRY LABORATORY »



(c) Maurice Leroy - Tous droits réservés

APR-Strasbourg - 21 avril 2006

46

# CONCLUSION

- Actinide chemistry :
  - an active, wide and fruitful research field !
  - a need for future nuclear systems !
  - new challenges, new fuels, new processes...
- A real need to better master some fundamental issues!
- Sustain and promote international cooperation and networking !

Merci de votre attention