

Le cycle du combustible

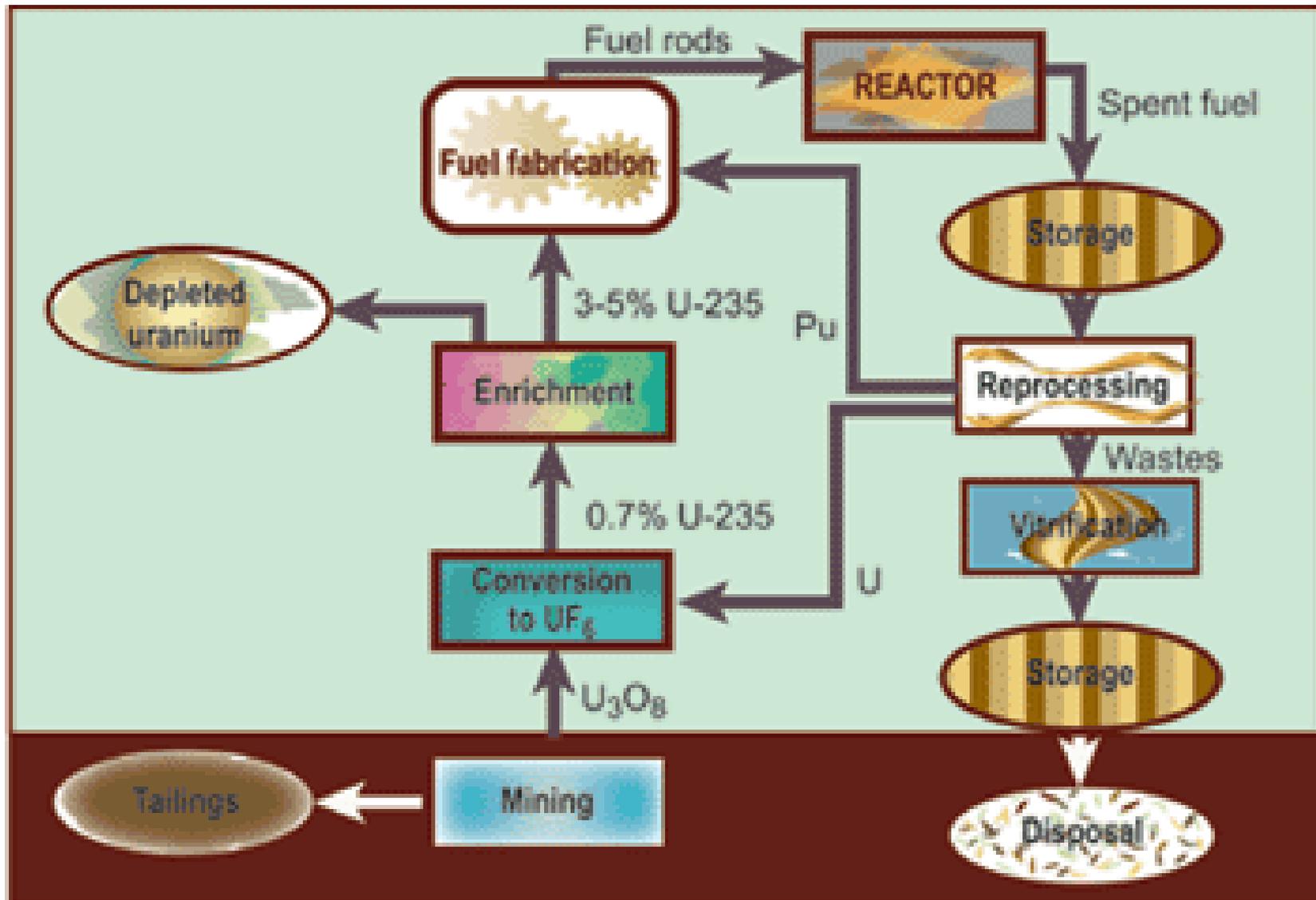
H.Nifenecker

Cours UIAD 2009-2010

Cycle du combustible

- Conversion
- Enrichissement
- Retraitement
- Fabrication du MOx
- Stratégie MOx
- Perspectives

Vue d'ensemble



Concentration

- Concassage du minerai
- Attaque à l'acide sulfurique (minerais acides) ou au Carbonate de soude sous pression et à chaud
- Lavage et filtration
- Purification par échange d'ions (TBP: tributyl phosphate)
- Yellow cake (uranate d'ammonium ou de magnésie)
 - $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$
 - MgU_2O_7

La conversion

Transformer le Yellow Cake en UF_6

COMURHEX Malvesi.

Concentrés \rightarrow dissolution $HNO_3 \rightarrow UO_2(NO_3)_2$ impur
 \rightarrow extraction TBP $\rightarrow UO_2(NO_3)_2$ pur \rightarrow dénitrification
 $\rightarrow UO_3 \rightarrow$ réduction $NH_3 \rightarrow UO_2 \rightarrow$ hydrofluoration HF
 $\rightarrow UF_4 \rightarrow$ fluoration $\rightarrow UF_6$ pur

UF_6 gazeux à $56\text{ }^\circ\text{C}$

conversion dans le monde

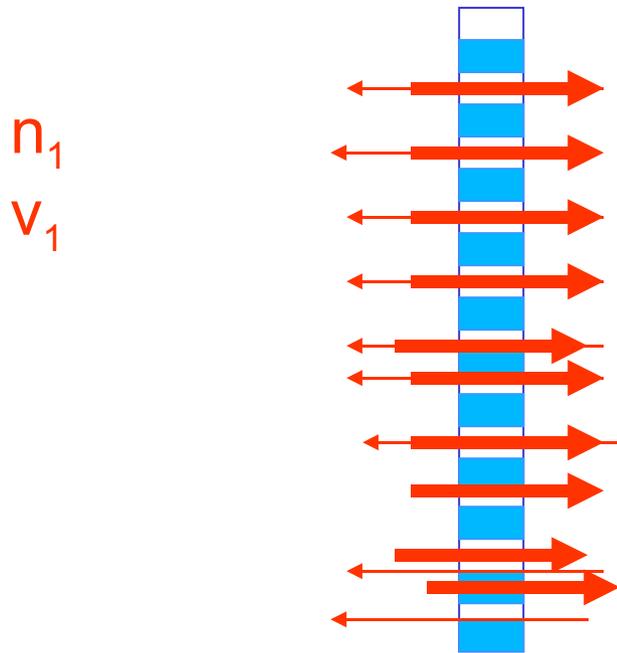
	USA	F	Ca	Ru	UK	Total
Tons U	15000	14500	12500	15000	6600	76090
%	20	19	16	20	8	

Enrichissement

Pour séparer 1 kg d'uranium naturel en uranium enrichi en ^{235}U à 3,5% et pour un uranium appauvri à 0,2% il faut environ 3 UTS, et on obtient 155 g d'uranium enrichi.

La quantité d'uranium ^{235}U présente dans l'uranium naturel est de 7,1 grammes celle présente dans l'uranium enrichi de 5,5 grammes et celle encore présente dans l'uranium appauvri de 1,6 grammes.

Enrichissement diffusion 1



$$\frac{dn_2}{dt} = n_1 v_1 - n_2 v_2$$

$$\frac{dn_2^5}{n_2^5 dt} = \left(\frac{n_1^5}{n_2^5} - 1 \right) v_1^5$$

$$\frac{dn_2^5}{dt} = n_1^5 v_1^5 - n_2^5 v_2^5$$

$$\frac{dn_2^8}{dt} = n_1^8 v_1^8 - n_2^8 v_2^8$$

Enrichissement diffusion 2

$$\frac{dn_2^{(5)}}{n_2^{(5)} dt} = \left(\frac{n_1^{(5)}}{n_2^{(5)}} - 1 \right) v_1^{(5)}$$

$$\frac{dn_2^{(8)}}{n_2^{(8)} dt} = \left(\frac{n_1^{(8)}}{n_2^{(8)}} - 1 \right) v_1^{(8)}$$

$$p_1 = n_1^{(5)} \left(v_1^{(5)} \right)^2 + n_1^{(8)} \left(v_1^{(8)} \right)^2$$

$$p_2 = n_2^{(5)} \left(v_2^{(5)} \right)^2 + n_2^{(8)} \left(v_2^{(8)} \right)^2$$

$$\frac{n_1^{(5)}}{n_2^{(5)}} \cong \frac{n_1^{(8)}}{n_2^{(8)}} \cong \frac{n_1^{(5)} + n_1^{(8)}}{n_2^{(5)} + n_2^{(8)}} \cong \frac{p_1}{p_2} \gg 1$$

Enrichissement diffusion 3

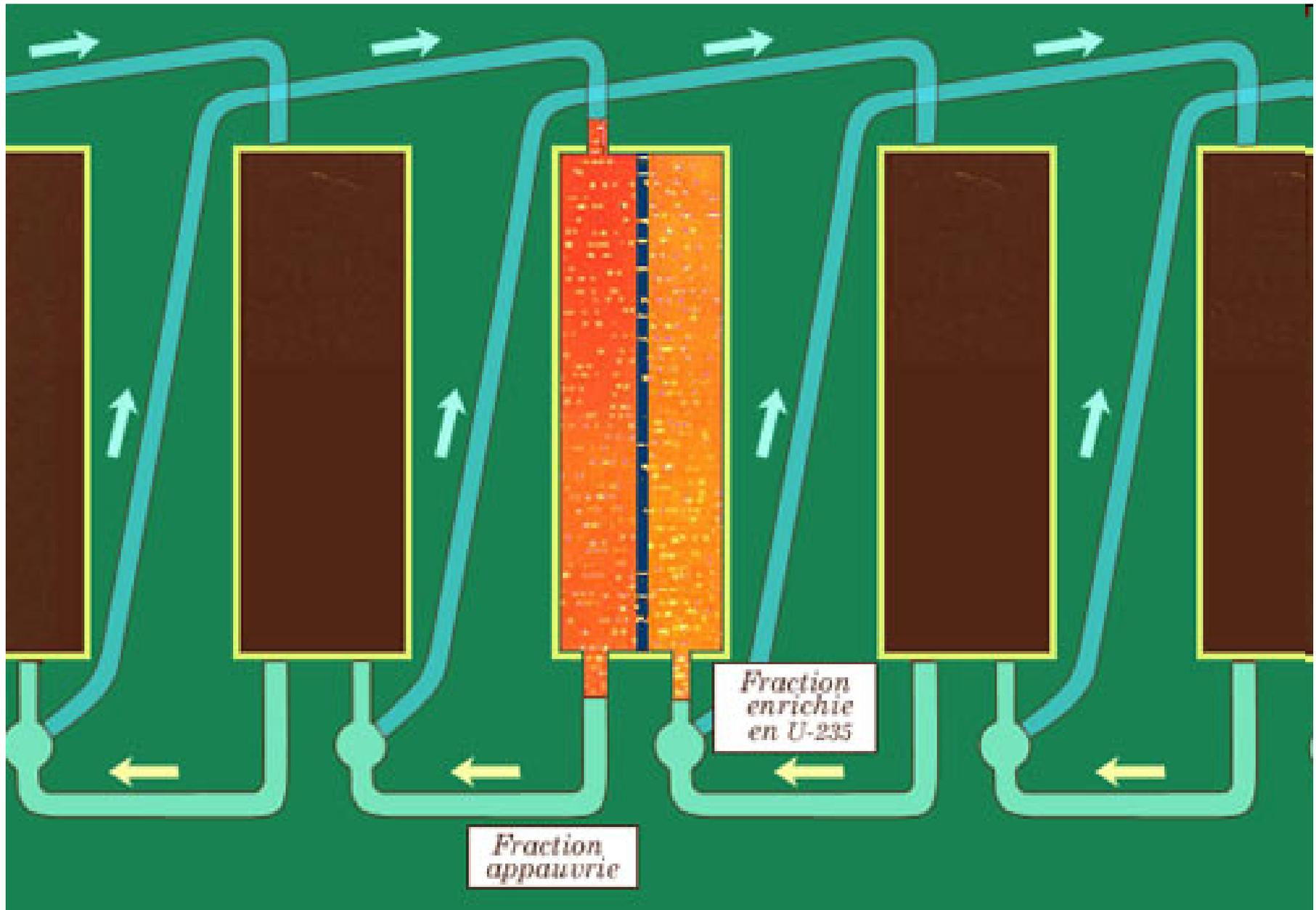
$$\frac{\frac{dn_2^{(5)}}{n_2^{(5)} dt}}{\frac{dn_2^{(8)}}{n_2^{(8)} dt}} = \frac{\left(\frac{n_1^{(5)}}{n_2^{(5)}} - 1\right) v_1^{(5)}}{\left(\frac{n_1^{(8)}}{n_2^{(8)}} - 1\right) v_1^{(8)}} \cong \frac{\left(\frac{n_1^{(5)}}{n_2^{(5)}}\right) v_1^{(5)}}{\left(\frac{n_1^{(8)}}{n_2^{(8)}}\right) v_1^{(8)}} \cong \frac{\left(\frac{p_1}{p_2}\right) v_1^{(5)}}{\left(\frac{p_1}{p_2}\right) v_1^{(8)}} = \frac{v_1^{(5)}}{v_1^{(8)}}$$

$$kT = m^{(5)} \left(v_1^{(5)}\right)^2 \qquad kT = m^{(8)} \left(v_1^{(8)}\right)^2$$

$$\frac{v_1^{(5)}}{v_1^{(8)}} = \sqrt{\frac{m^{(8)}}{m^{(5)}}} = \sqrt{\frac{238 + 6 \times 19}{235 + 6 \times 19}} = 1,0042$$

Dans la réalité le facteur d'enrichissement est de l'ordre de 1,002
 800 étages pour passer de 0.007 à 0.035.
 2500 pour 90%

Cascades de diffusion



Centrifugation 1

Introduction

Equation de Newton $F = m\gamma$ $F = mg$ $g = \gamma$

La masse n'apparaît plus

Quelque soient leurs masses les satellites ont les mêmes trajectoires

Mais les gaz lourds se concentrent au niveau du sol... Pourquoi?

L'énergie d'une molécule est :

$$E = \frac{1}{2} m \left(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \right) + mgz$$

Probabilité pour une énergie E dans un gaz de température T:

$$p(E)dE = e^{-\frac{E}{T}} dE = e^{-m \frac{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) + gz}{2T}} dE$$

$$p(z)dz = e^{-\frac{mgz}{2T}} dz \quad \langle z \rangle = \frac{2T}{mg}$$

Centrifugation 2

Energie centrifuge

$$v = \omega r \quad F = \frac{mv^2}{r} = m\omega^2 r$$

$$V = -\frac{m\omega^2 r^2}{2} \quad p(r) \approx e^{-\frac{m\omega^2 r^2}{2T}}$$

$$\frac{p^{(5)}(r)}{p^{(8)}(r)} = e^{-\frac{\omega^2 r^2 (m^{(8)} - m^{(5)})}{2T}} = e^{-6,03 \times 10^{-5} \frac{\omega^2 r^2 (238 - 235)}{2T}}$$

Centrifugation 3

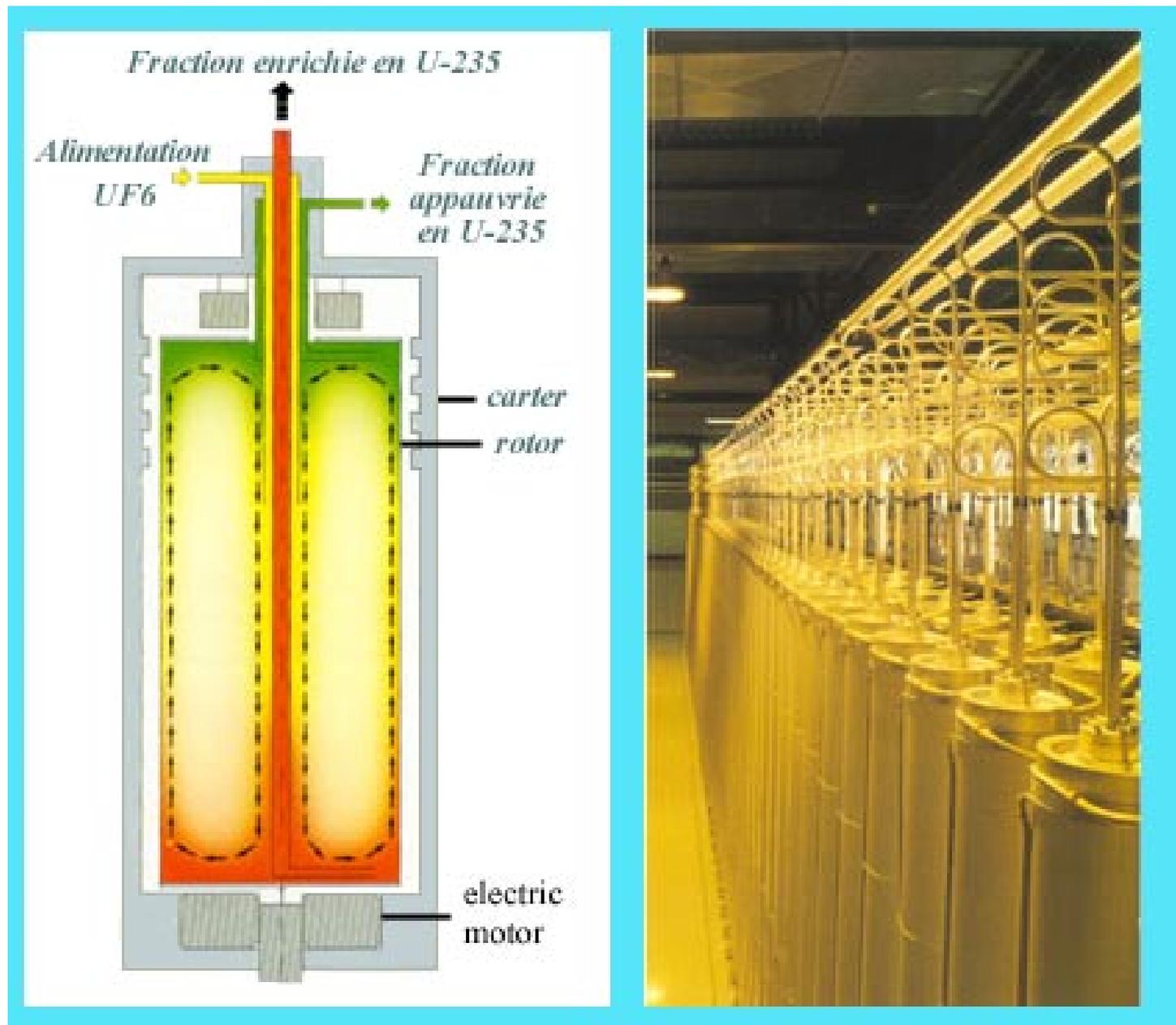
Energie centrifuge

$$\frac{p^{(5)}(r)}{p^{(8)}(r)} = e^{-6,03 \times 10^{-5} \frac{(N 2\pi r)^2 (238 - 235)}{T}}$$

Vitesse de rotation max (fibres de carbone): 800 m/s

$$\frac{p^{(5)}(r)}{p^{(8)}(r)} = e^{-6,03 \times 10^{-5} \times \frac{38,6 \times 3}{T}}$$

centrifugeuses

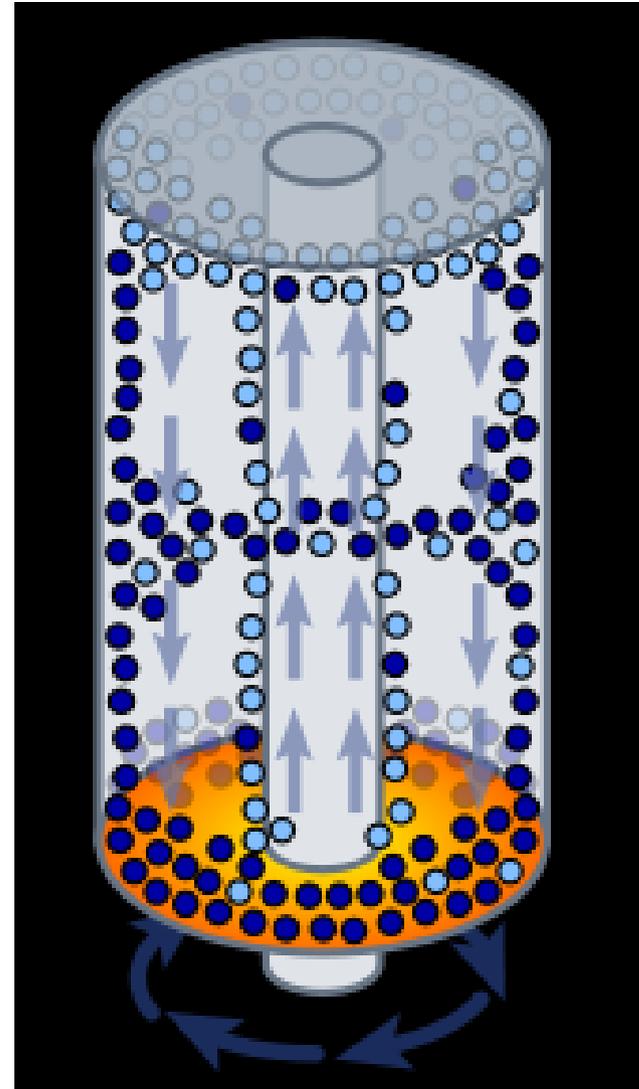


La centrifugeuse de Zippe

Facteur de séparation:
Environ 1,3

55 étages pour 3,5%
Au lieu de 800

164 pour 90%
Au lieu de 2500



Enrichissement dans le monde

1 UTS = 2400 kWh pour la diffusion, 50 kWh pour la centrifugation

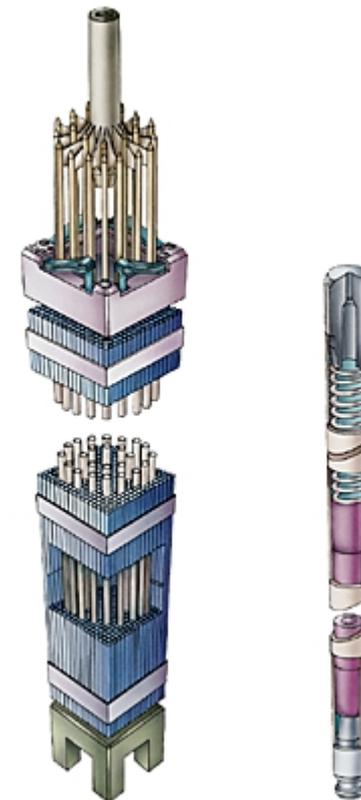
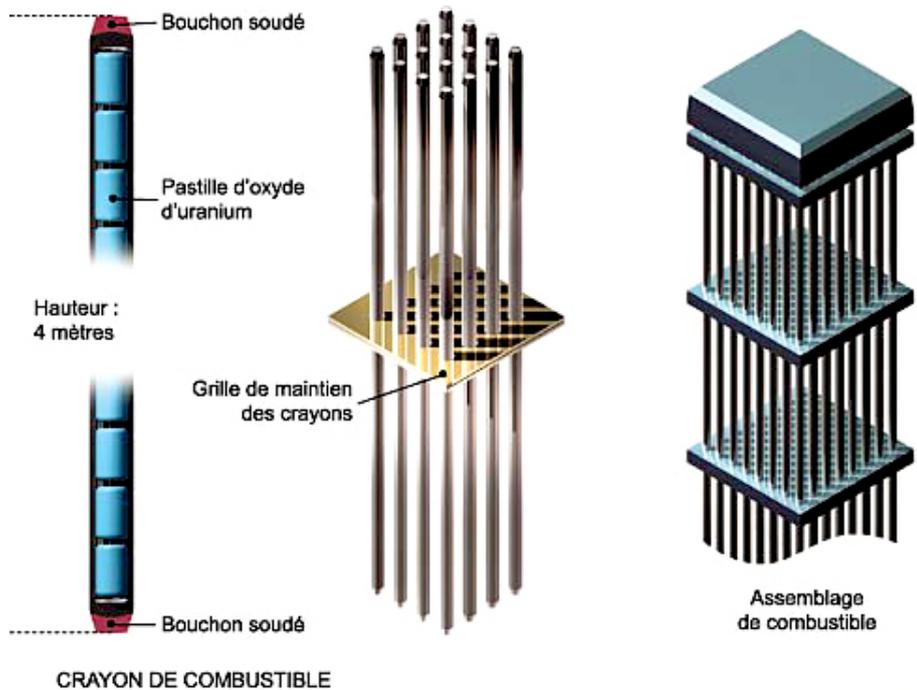
GB1 : 26 TWh

GB2 : 375 MWh

	2006	2015
France	10800	7500
Urenco	9000	15000
USA	8000	7500
Russie	25000	33000
Chine	1000	2000
Japon	1050	1500
Autres	300	300
Total	54150	57000
Milliers d'UTS		

Combustible nucléaire

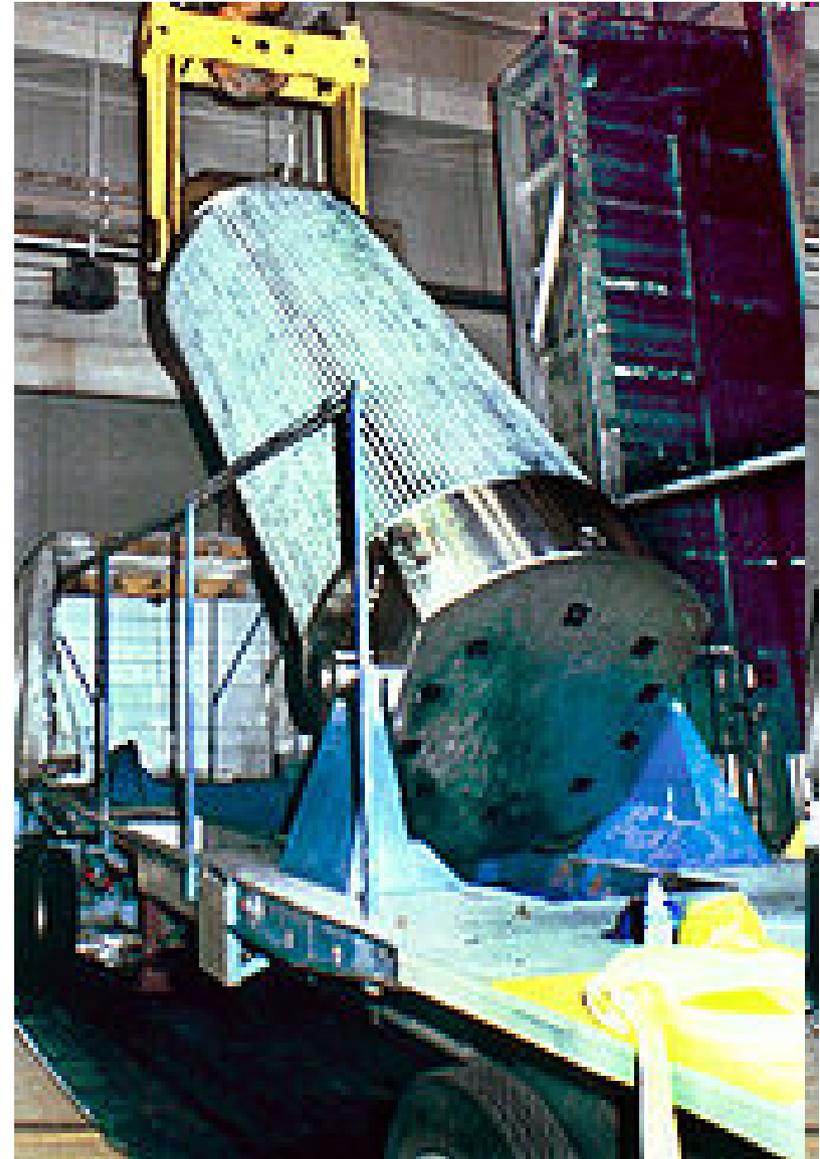
Fabrication des combustibles en France:
FBFC Franco Belge de Fabrication de Combustible
Romans/Isère
AREVA: 1/3 du marché mondial



Détails (1300 MW)

Nb d'assemblages 17x17	193
Nb de crayons par assemblage	264
Gaine diamètre	9,5
épaisseur	0,57
Diamètre pastilles	8,2
Longueur assemblage	4796
Nombre de grilles	10
Section de l'assemblage	214x214
Masse de l'assemblage (Uranium)	765(538)
Nombre de tubes guides	24

Transport de combustible irradié

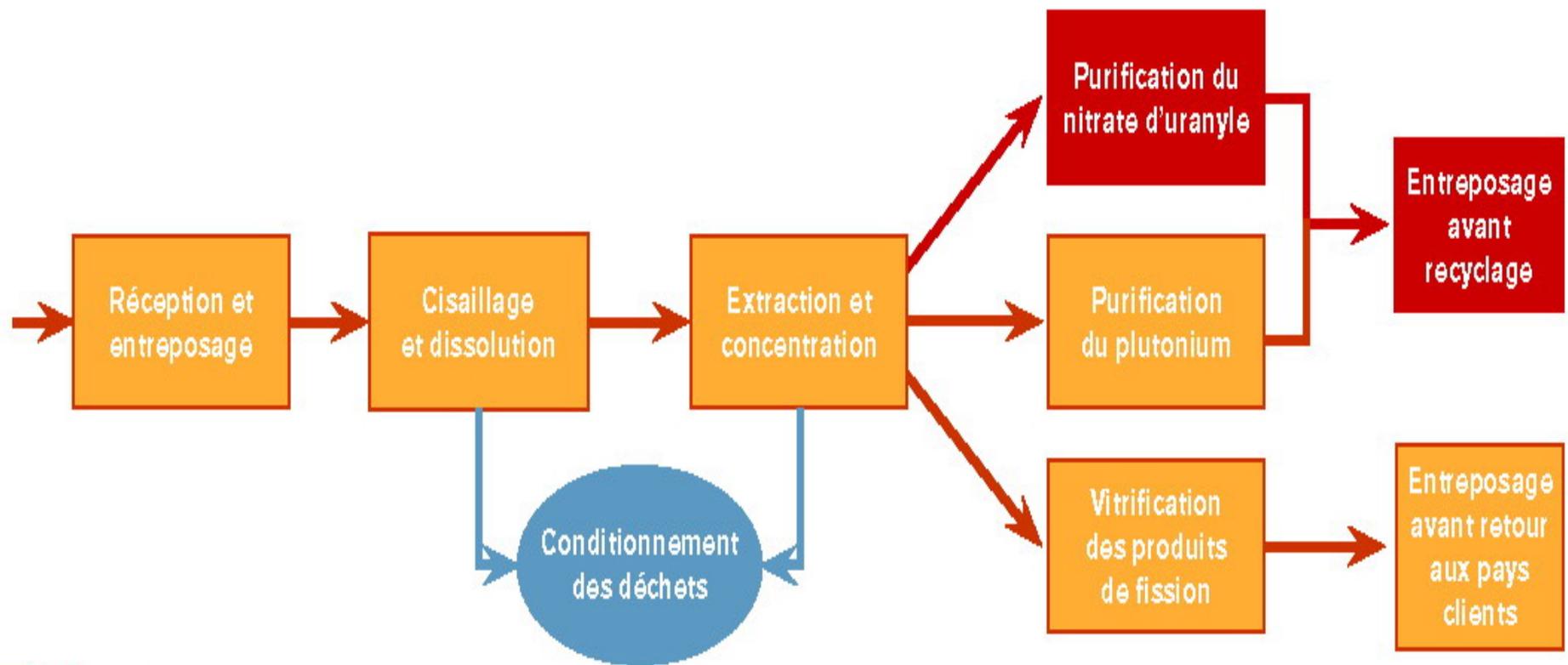


Conditions pour les châteaux

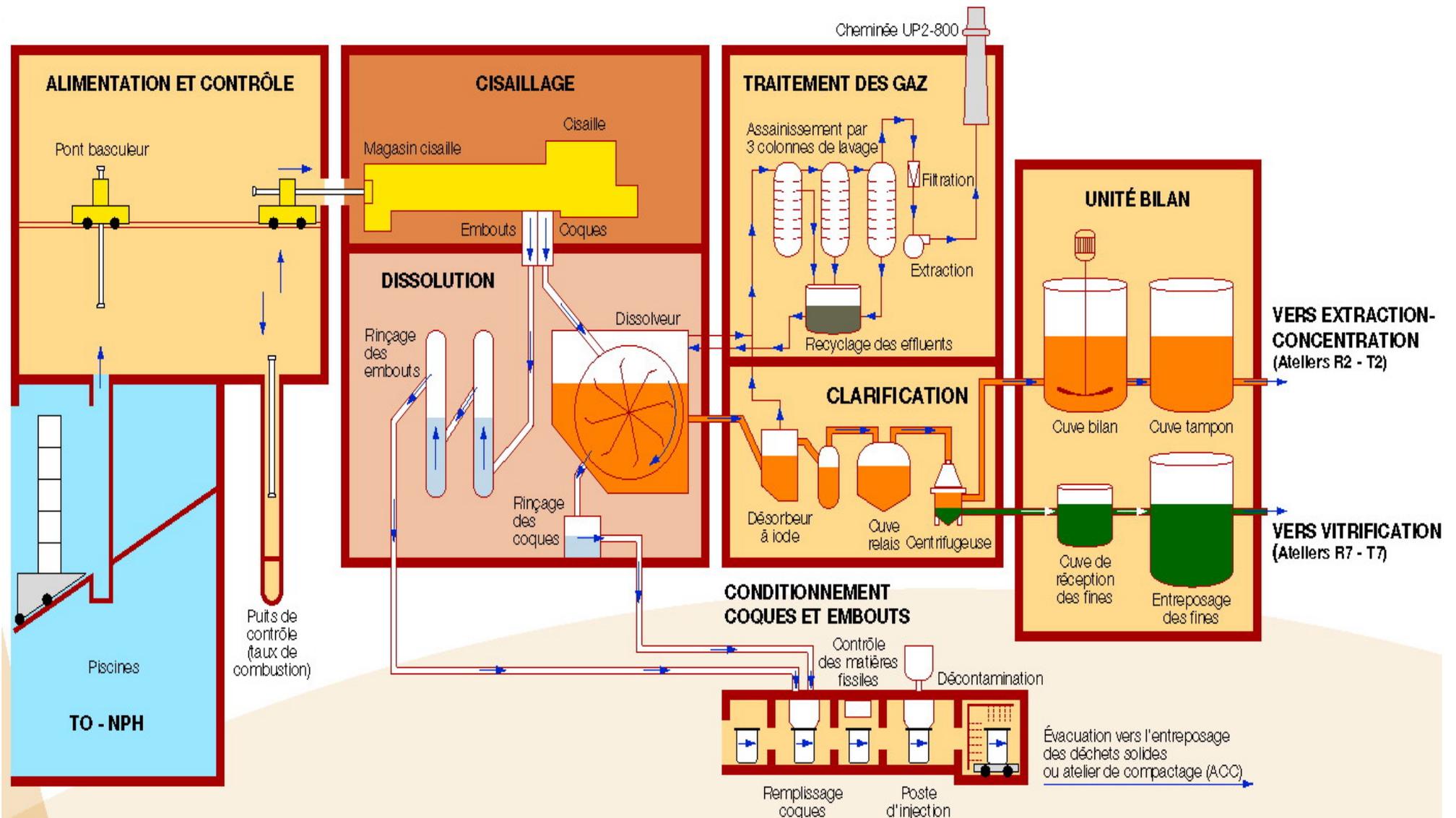
Réglementation AIEA

- Chute d'une hauteur de 9 m. sur une surface dure
- Chute de 1m sur une tige d'acier de 15 cm de diamètre
- 30 minutes dans un feu à 800 °C
- 8 heures d'immersion sous 90 cm d'eau
- Immersion d'une heure sous 200 m d'eau

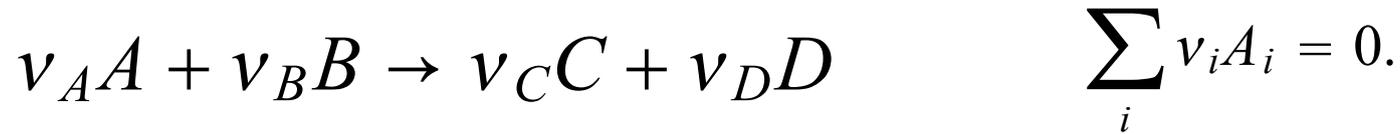
Vue d'ensemble



Cisailage



Cinétique chimique



Potentiel chimique à l'équilibre $\sum_i v_i \mu_i = 0$ concentrations $c_A = \frac{n_A}{N}$

Loi d'action de masse $\prod_i c_i^{v_i} = K(P, T, \{\psi_i\})$

Milieu dilué $\psi_i = \mu_i - T \ln c_i$. $K(P, T, \{\psi_i\}) = e^{-\frac{\sum_i v_i \psi_i}{T}}$

$$K(P, T) = e^{-\frac{v_A \Delta G_A(T) + v_B \Delta G_B(T) - v_C \Delta G_C(T) - v_D \Delta G_D(T)}{RT}} \quad \Delta G(T) = \Delta H - T \Delta S$$

$$H = U + pV. \quad \text{Enthalpie de formation} \quad \Delta H$$

activité

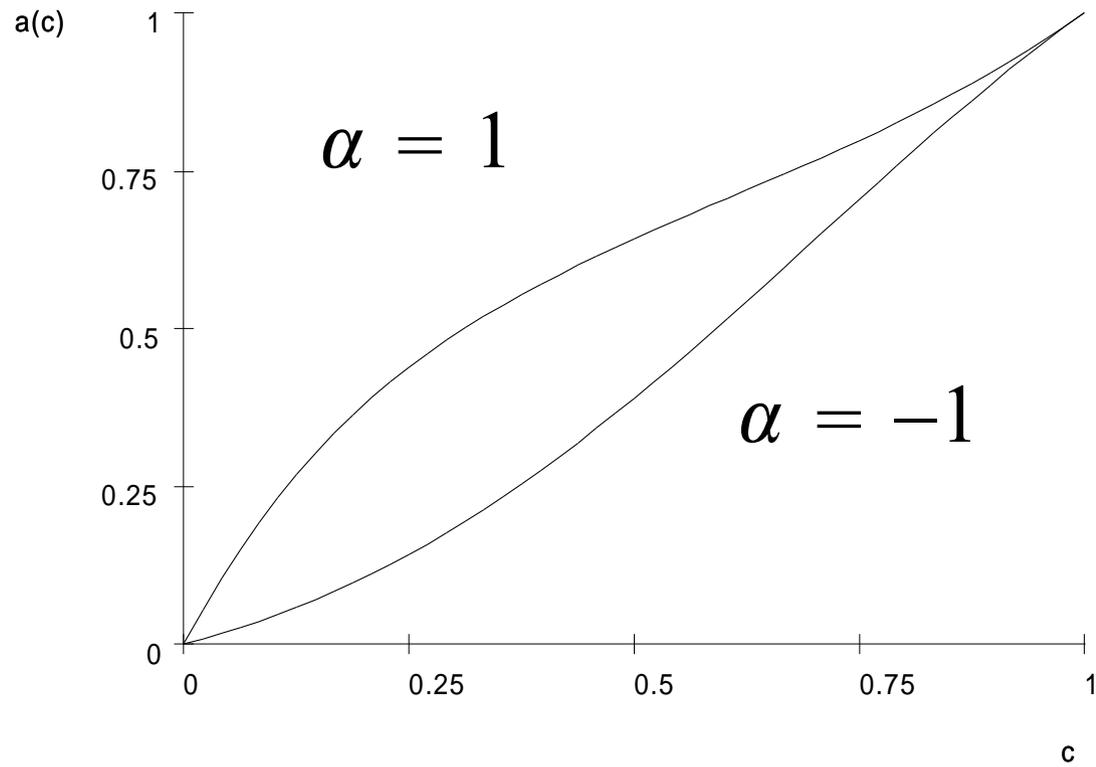
$$a_i = \gamma_i c_i \quad \prod_i a_i^{v_i} = K(P, T, \{\psi_i\})$$

$$\gamma_i(c_i) = e^{\alpha(1-c_i)^2}$$

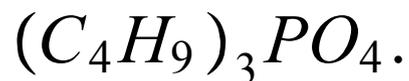
Dans le cas où faibles variations des concentrations γ_i constants

$$\prod_i c_i^{v_i} = \frac{K(P, T, \{\psi_i\})}{\prod_i \gamma_i^{v_i}} = K^*(P, T, \{\psi_i\})$$

examples



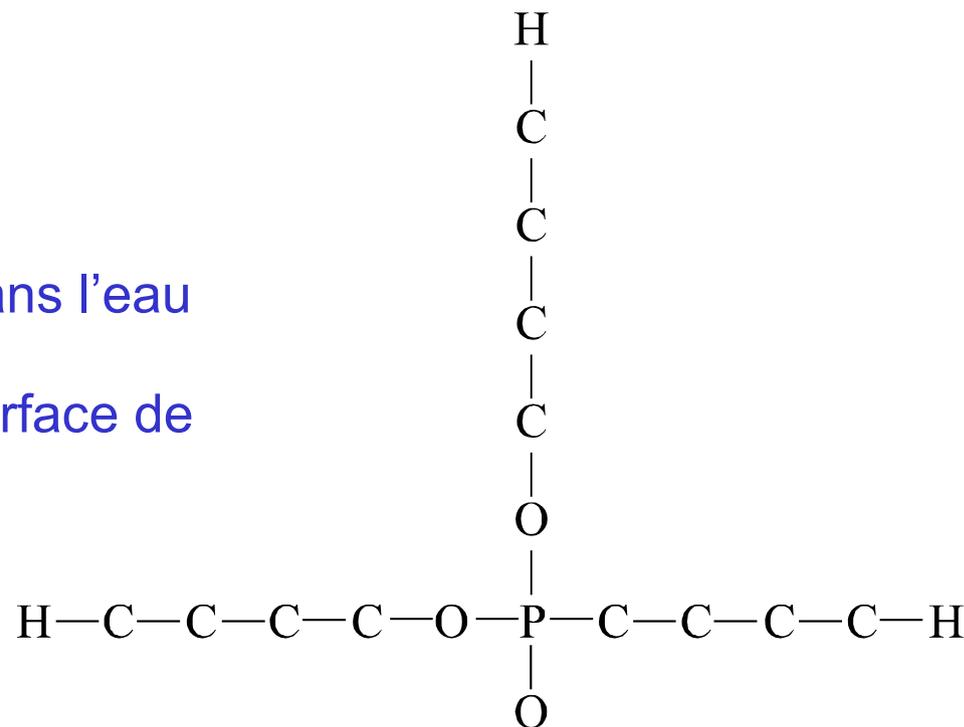
TBP



TBP soluble dans un hydrocarbure, pas dans l'eau

Fixation sur les liaisons non saturées du O

Complexe avec le nitrate d'uranyle à la surface de séparation eau (aq)-organique (o)



$$K_U = \frac{[UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TBP(o)]}{[UO_2^{2+}(aq)] \cdot [NO_3^-(aq)]^2 \cdot [TBP(o)]^2}$$

$$K_{Pu} = \frac{[Pu(NO_3)_4 \cdot 2TBP(o)]}{[Pu^{4+}(aq)] \cdot [NO_3^-(aq)]^4 \cdot [TBP(o)]^2}$$

Coefficients de distribution

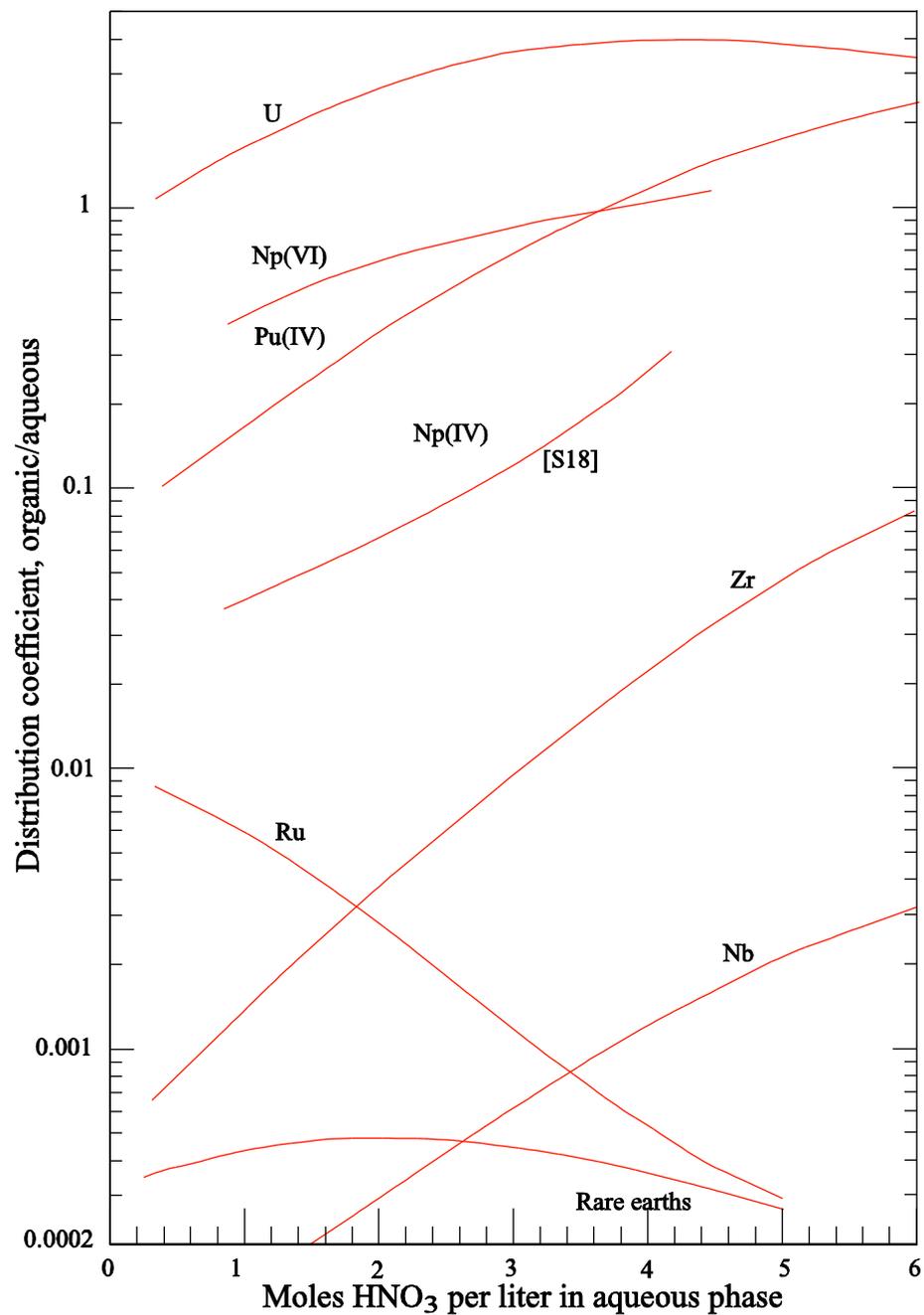
$$K_U = \frac{[UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TBP(o)]}{[UO_2^{2+}(aq)] \cdot [NO_3^-(aq)]^2 \cdot [TBP(o)]^2}$$

$$K_{Pu} = \frac{[Pu(NO_3)_4 \cdot 2TBP(o)]}{[Pu^{4+}(aq)] \cdot [NO_3^-(aq)]^4 \cdot [TBP(o)]^2}$$

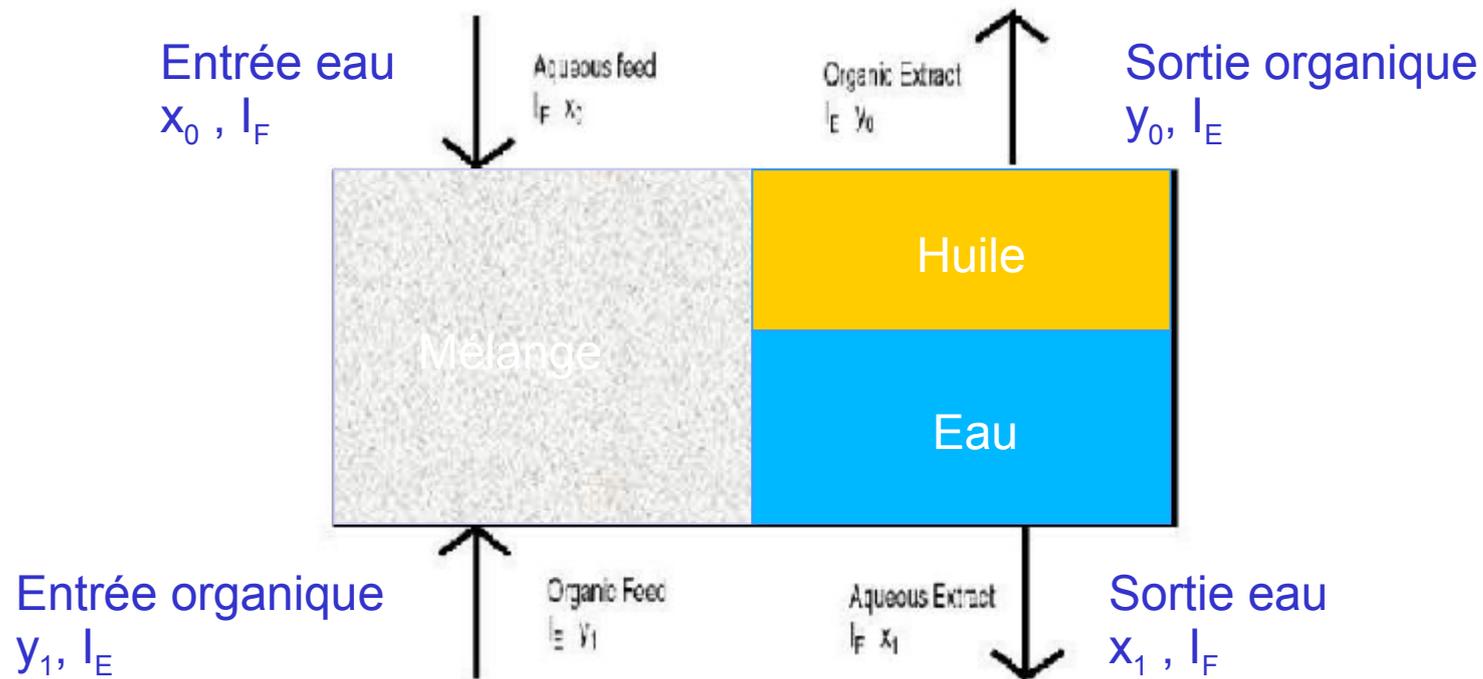
Coefficient de distribution

$$D_U = \frac{[UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TBP(o)]}{[UO_2^{2+}(aq)]} \longrightarrow D_U = K_U [NO_3^-(aq)]^2 \cdot [TBP(o)]^2$$

Fractionnement organique/eau



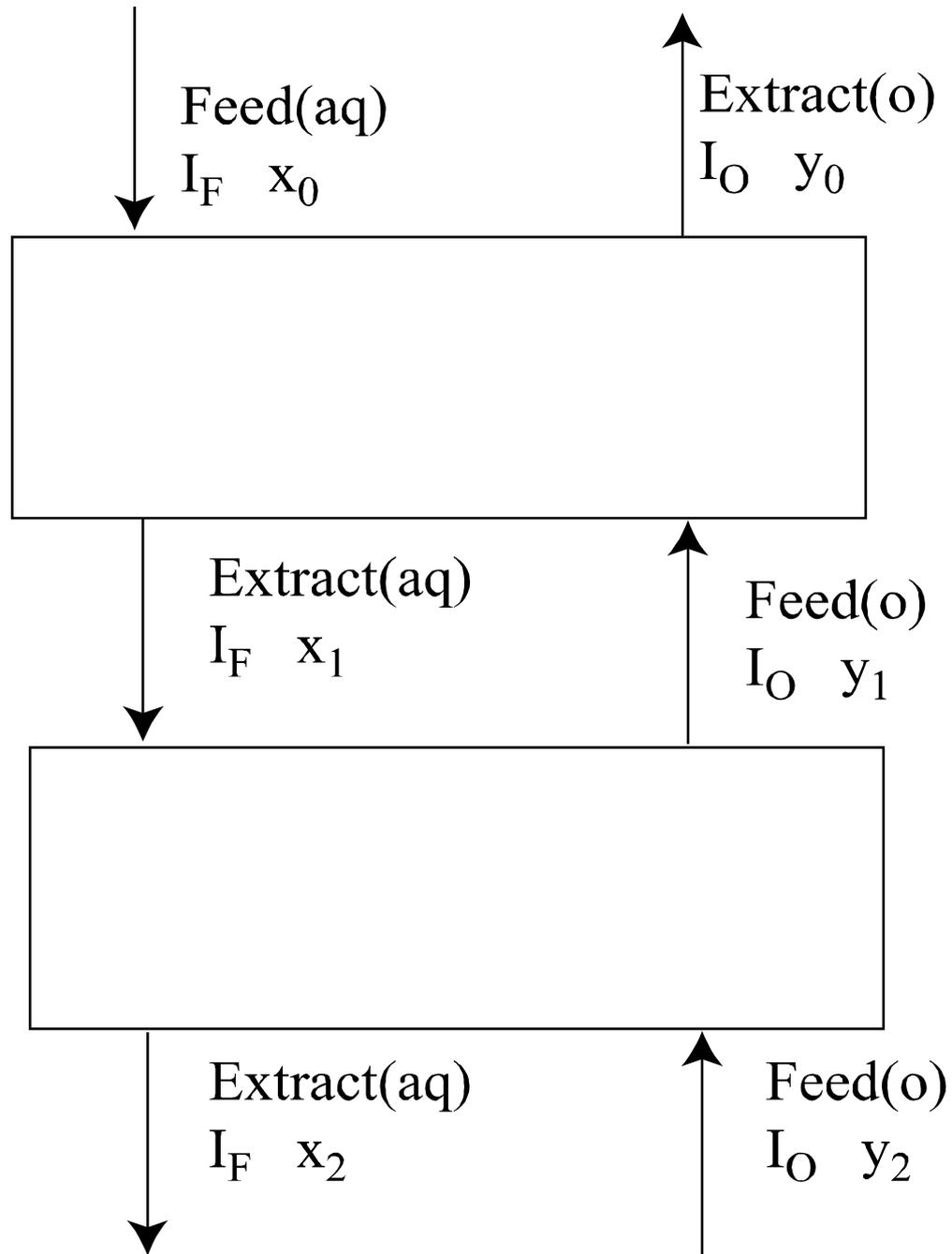
Etage élémentaire



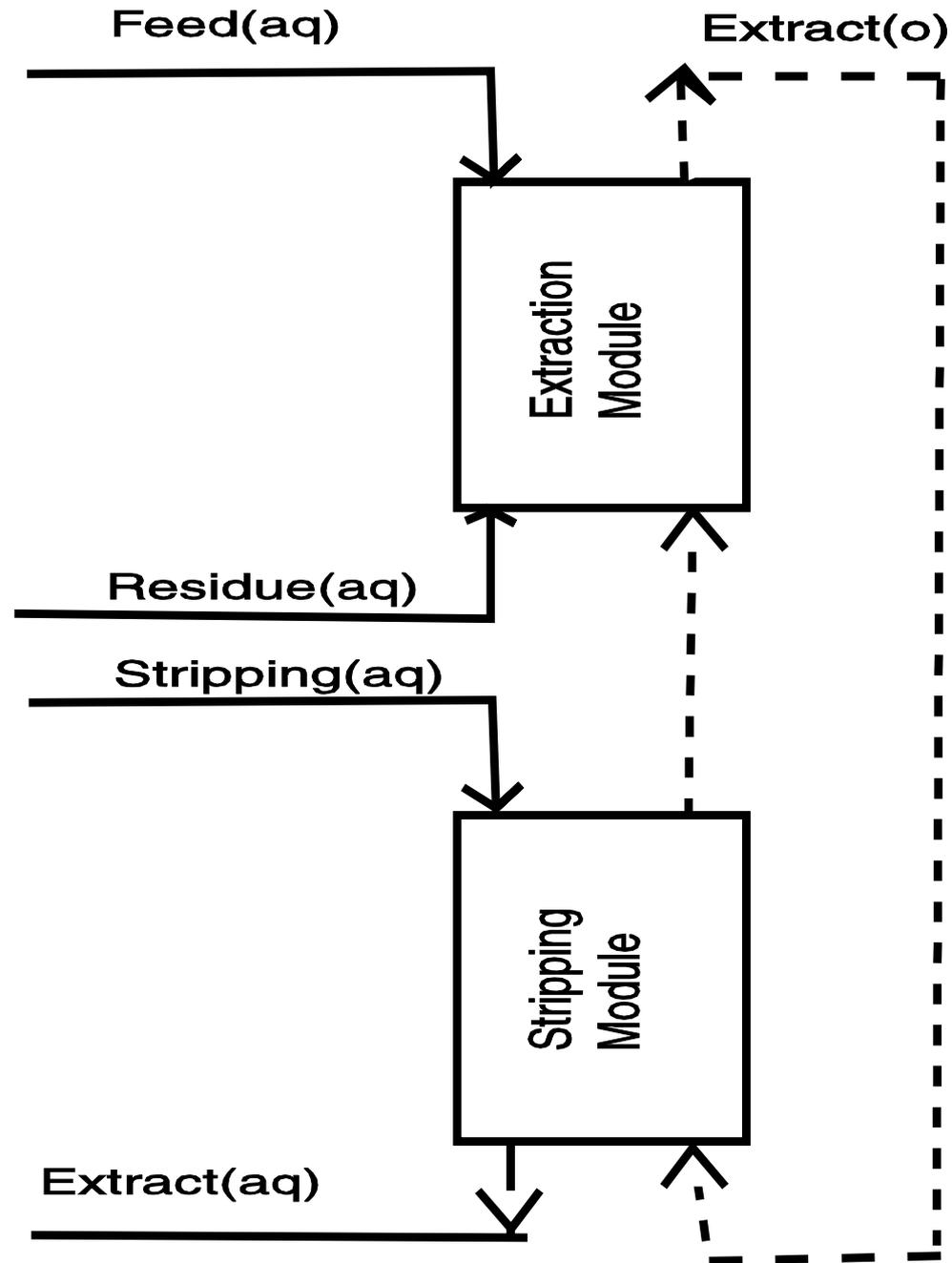
$$I_F x_0 + I_E y_1 = y_0 I_E + I_F x_1$$

$$\rho = \frac{I_E y_0}{I_F x_0}$$

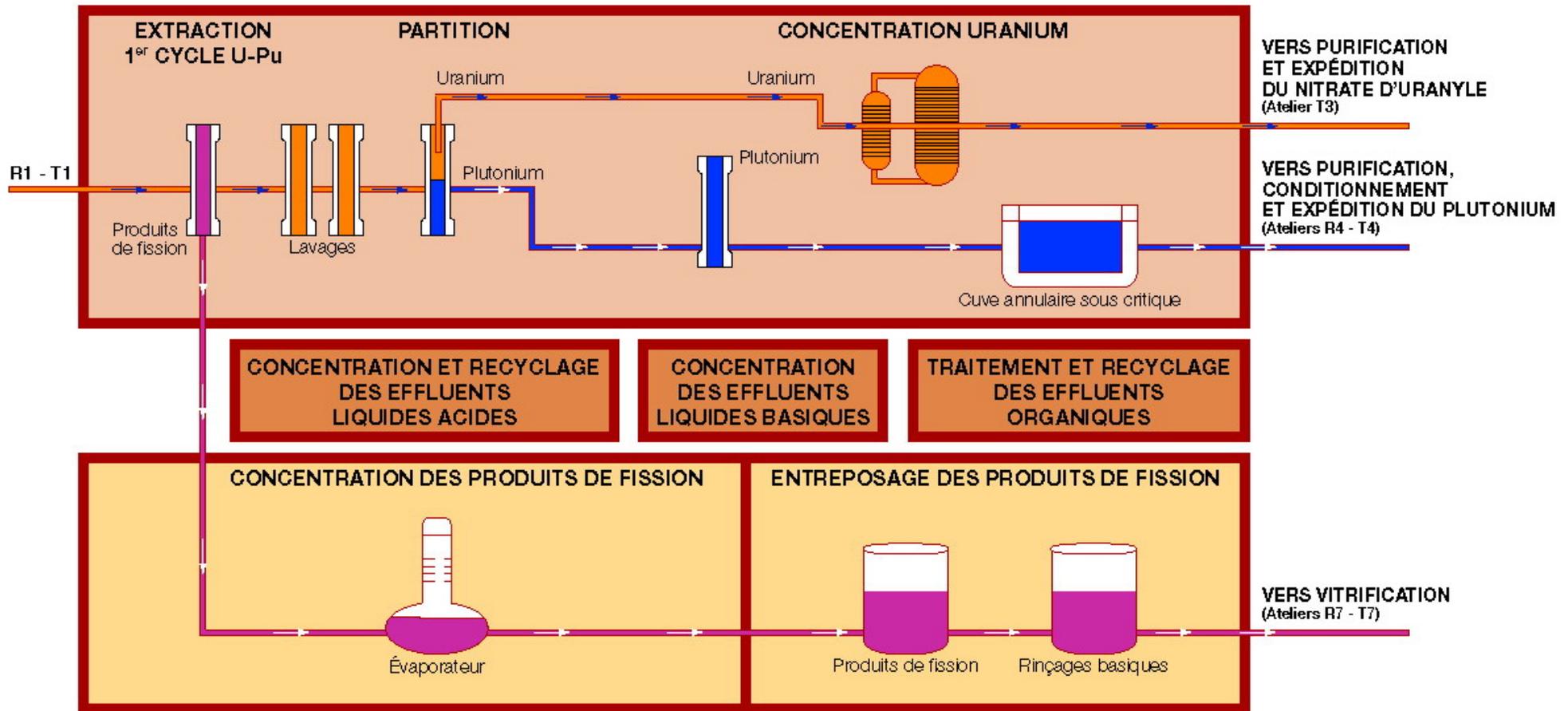
Cascade



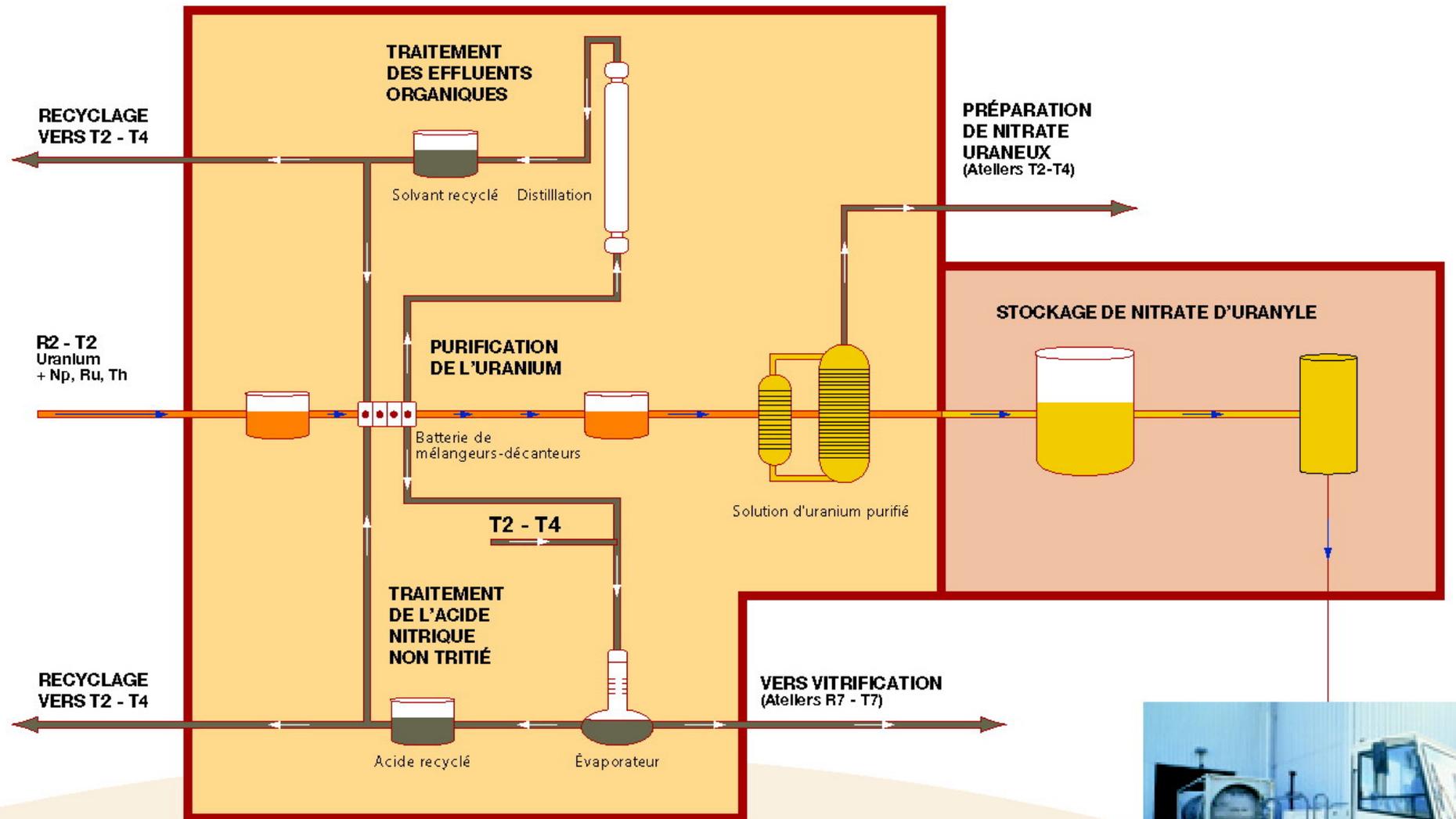
Régénération TBP



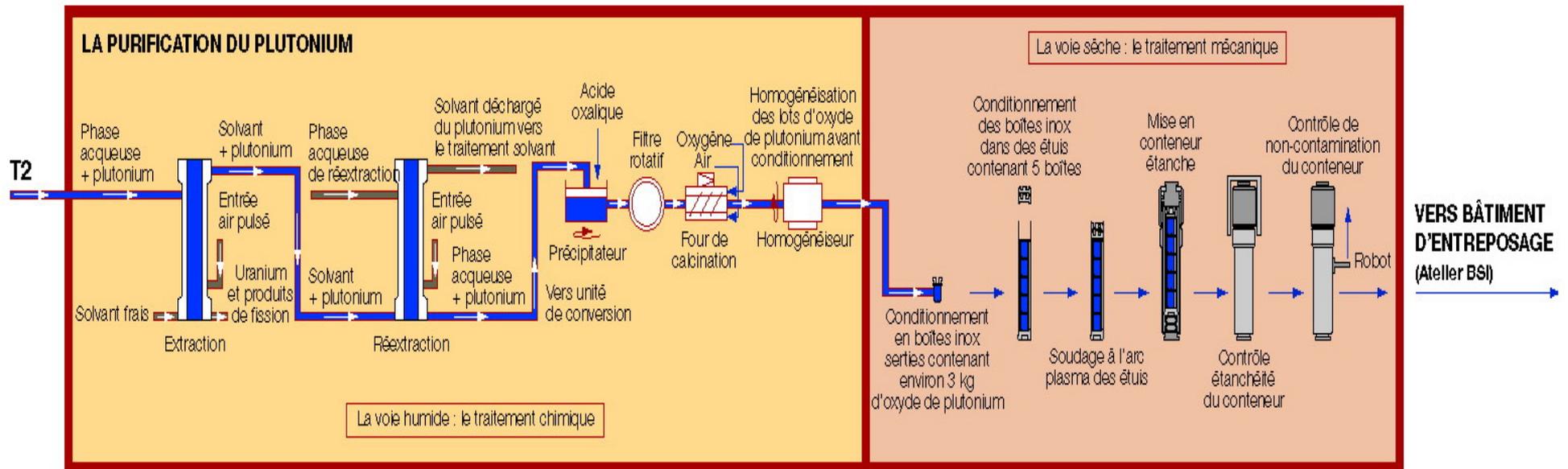
Extraction-séparation



Séparation uranium



Séparation Plutonium



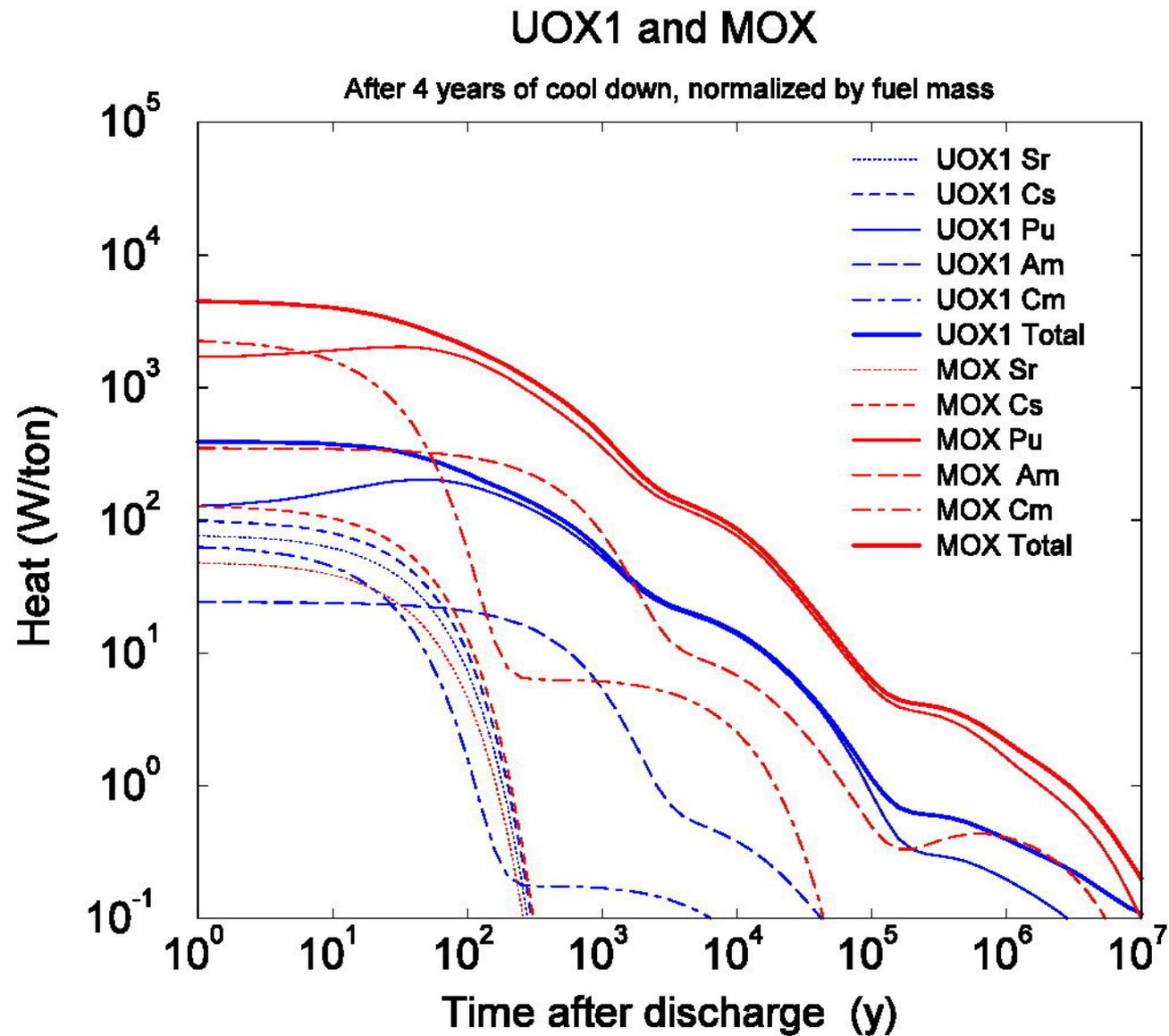
Retraitement mondial

Pays	Usine	Tonnes retraitées/an	Capacité en GWe/an
France	La Hague	1700	60
UK	Sellafield	900	18
Japon	Rokkasho	800	28
Russie	Ozersk	400	14
Inde	Kalpakam	100	3
Total		3900	123

Problématique du MOx

	Pu 238	Pu 239	Pu 240	Pu 241	Pu 242
UOx 45 MWj/t	2%	50%	26%	15%	7%
MOx	4%	37%	32%	16%	12%

Dégagement de chaleur MOx



MOx Thorié

Nucleus	At loading (Kg/8TWhe)	MOx production (Kg/8TWhe)	Th MOx production (Kg/8TWhe)
^{233}U	0	0	278.72
^{239}Pu	1008	-500	-650
Total Pu	1900	-544	-800
Minor Actinides	0	139	119

Pouvoir de surgénération

