

Stockage géologique

H.Nifenecker

Références

Dossier Argile 2005

http://www.andra.fr/download/site-principal/document/dossier2005/D05A_266.pdf

Site SLC:

http://www.sauvonsleclimat.org/new/spip/spip.php?article203&var_mode=calcul

ACTIVITE DANS 1t DE COMBUSTIBLE USE

Activité dans une tonne de combustible irradié après 3 cycles en réacteur (pas de retraitement)

Après 10 ans de refroidissement, activité totale : $5 \cdot 10^5$ Ci/t

Cs 137	10^5 Ci/t	Sr 90	10^5 Ci/t
Pu 239	2 Ci/t	Tc 99	10 Ci/t
Np 237	0,5 Ci/t	Cs 135	0,5 Ci/t
Am 243	10^{-1} Ci/t	Pu 240	5 Ci/t
Am 241	10^3 Ci/t		

Après 1000 ans : $5 \cdot 10^2$ Ci/t
Cs 137 et Sr 90 ont disparu, activité 1000 fois moins

After 100 000 years : 50 Ci/t
Am 241 a disparu, activité 10 000 fois moins
95% par le plutonium

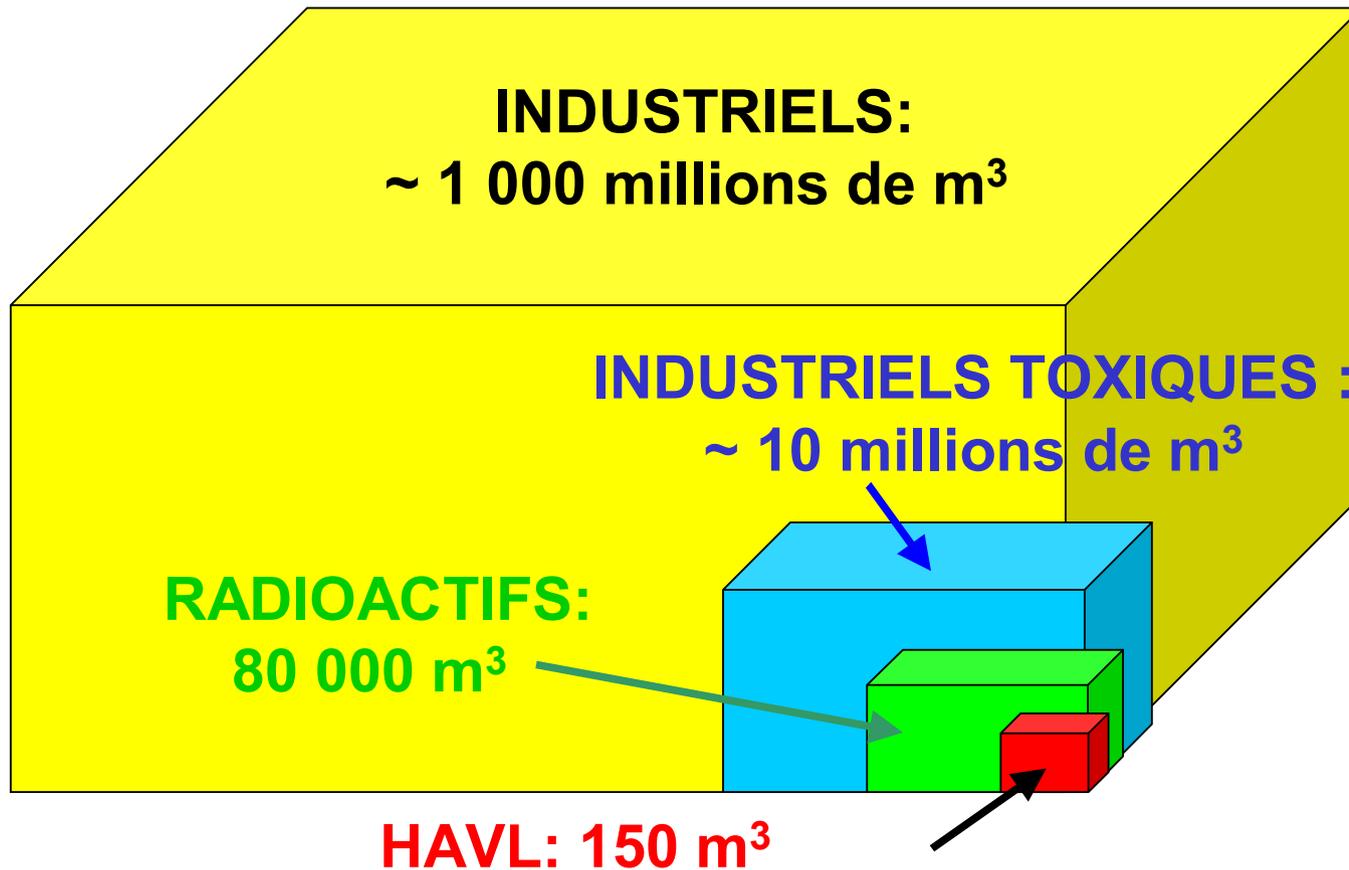
Evaluation globale

- Après 1000 ans un réacteur produit 10^5 Ci, sans retraitement
- Activité du premier km de la croûte terrestre:
 10^5 Ci/km²
- En France 1 réacteur/10000 km²
- For 100 ans de production le réacteur produit 1% de l'activité de la croûte correspondante

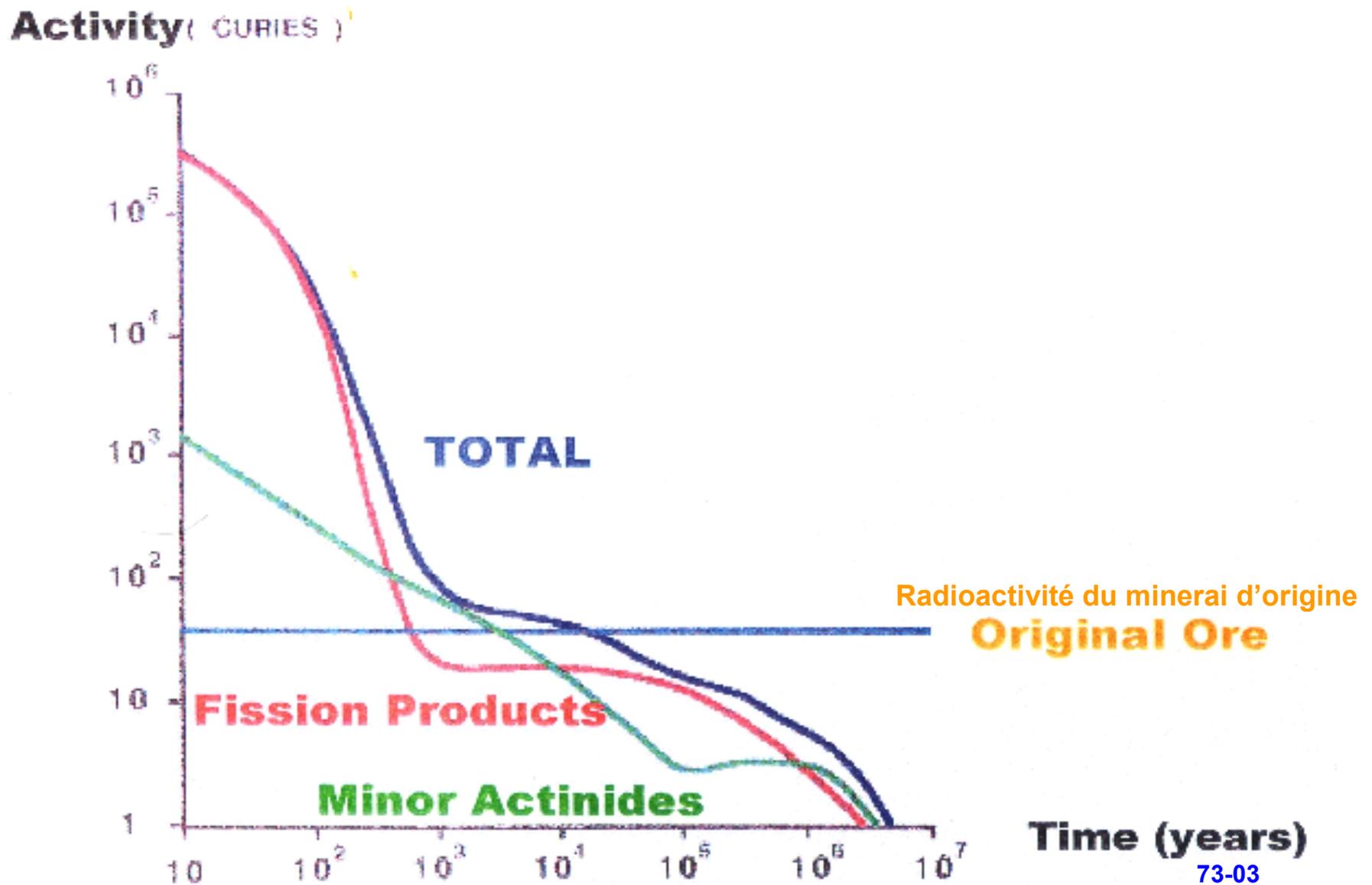
Volume des déchets

Production Annuelle de déchets Dans UE

SOURCE: CEE - 1993



Décroissance de la radioactivité de 1 ton de combustible utilisé (pas de retraitement)



Destination de divers types de déchets en France

radioactivité	Durée de Vie Courte (< 30 ans)	Longue (> 30 ans)
TFA	Stockage Surface	Etude
FA	Stockage Surface	Etude
(MA)	Stockage Surface	Stockage Géologique
HA	Stockage Géologique	Stockage Géologique

INVENTENTAIRE TOTAL

France: 2030, fin de GEN2

TFA mines	52 millions de tonnes
TFA démantèlement	1 à 2 millions m ³
FA courte DV	1 300 000 m ³
FA tritiée	35 000 m ³
FA long LT graphite	14 000 m ³
WA radifer	> 100 000 m ³
MA long LT	60 000 m ³
HA glasses	5 000 m ³
Used MOx	3500 tonnes

2002

Source : CEA (AT-D10)

Quantités totales
2030

Déchets/an/habitant en France

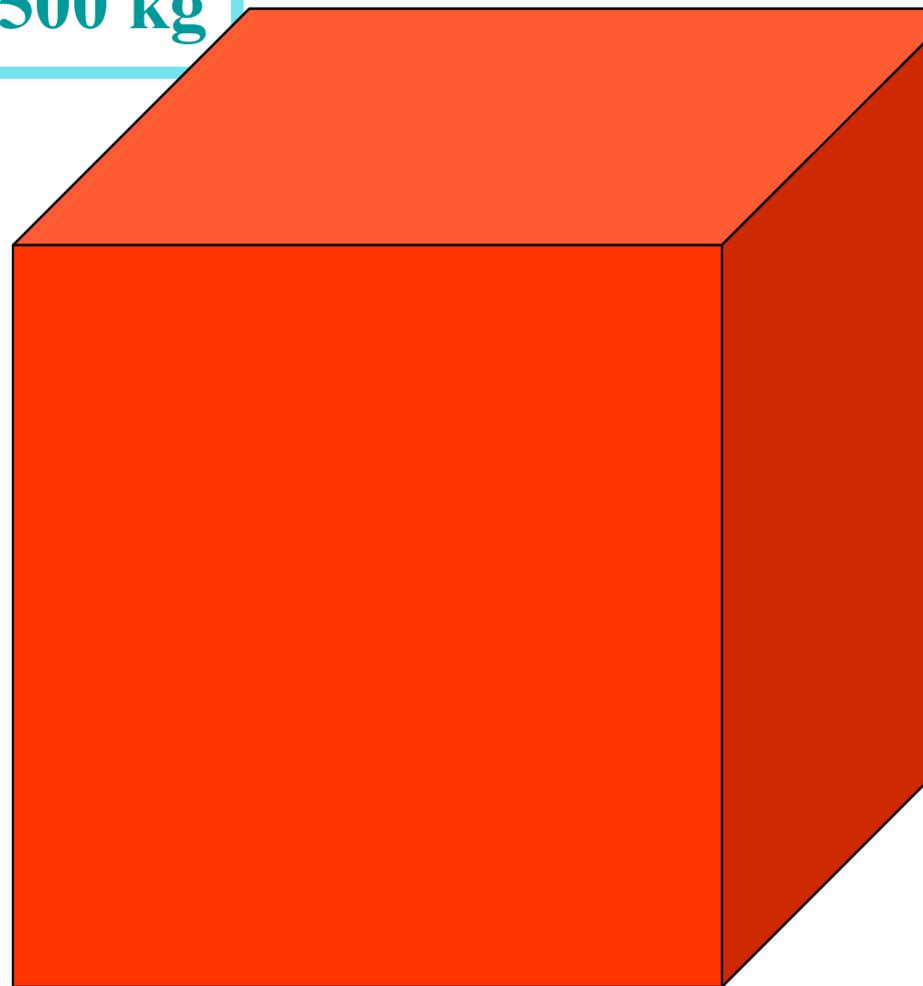
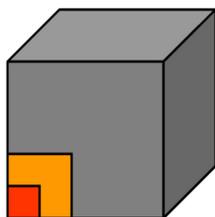
Déchets industriels : 2 500 kg

dont déchets toxiques :
100 kg

Déchets nucléaires
moins de 1 kg

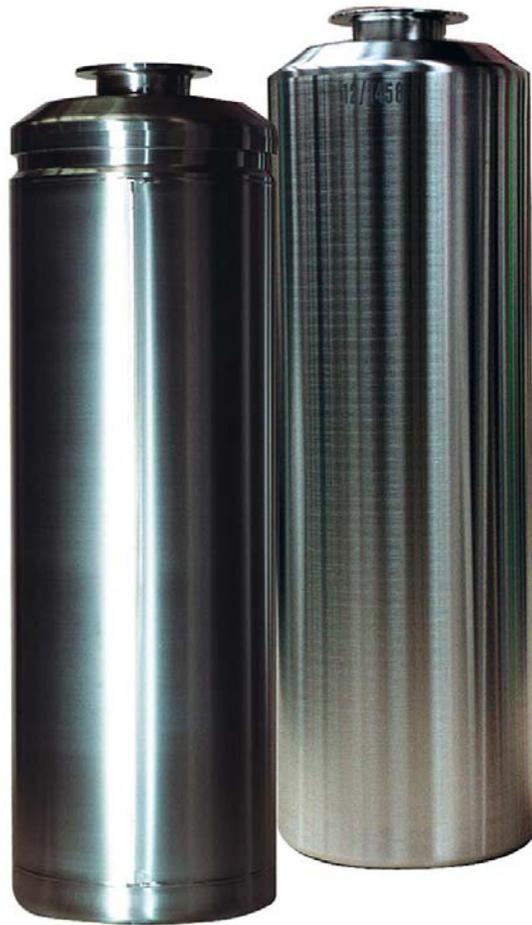
dont vie longue : 100g

dont HA : 10g



Comme il y en a peu, on les gère en totalité

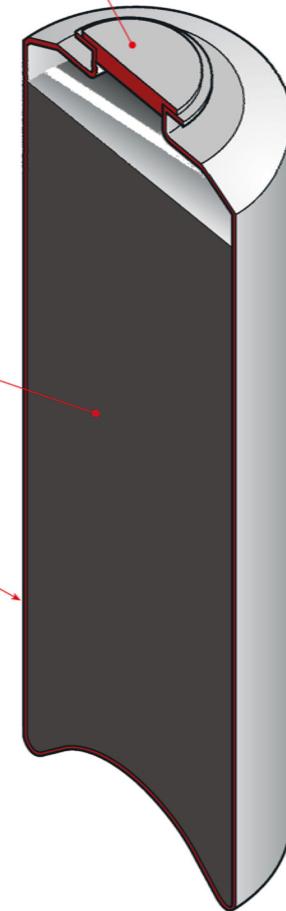
Conditionner pour le très long terme les déchets ultimes : Les Résidus vitrifiés



Couvercle extérieur (soudé)

Verre (produits
de fission vitrifiés)

Parois inox



Conteneurs Verres

Dimensions : Hauteur 135 cm
Diamètre : 46 cm

Poids :

Total :	500 kg
verre :	410 kg
PF :	50 kg
U (max) :	4,5 kg
Transuraniens :	2 kg
Dont Pu (max) :	110 g

Activité totale :	7000 TBq
Activité de surface : (max) :	4 Bq/cm ²
Puissance Thermique :	2 kW initial

Un 1300 MW « produit » 25 conteneurs par an.

Principe du stockage géologique

- Trois barrières:
 1. Le conteneur
 2. L'alvéole
 3. La couche géologique
- Principe du transfert radionuclide(Bures)
 - Retard à l'arrivée de l'eau sur les conteneurs **t>1000 ans**
 - Corrosion de l'enveloppe **t>10000 ans**
 - Dissolution du conteneur
 - ✓ Verres **t>100000 ans** (1 millions d'années?)
 - ✓ Combustibles **t>20000 ans**
 - Diffusion à travers les couches (granit, argile...)

Structure de l'argile

Rencontres MoMaS-PARIS, Lyon, 18-19 septembre 2003

11

- Milieu à trois échelles

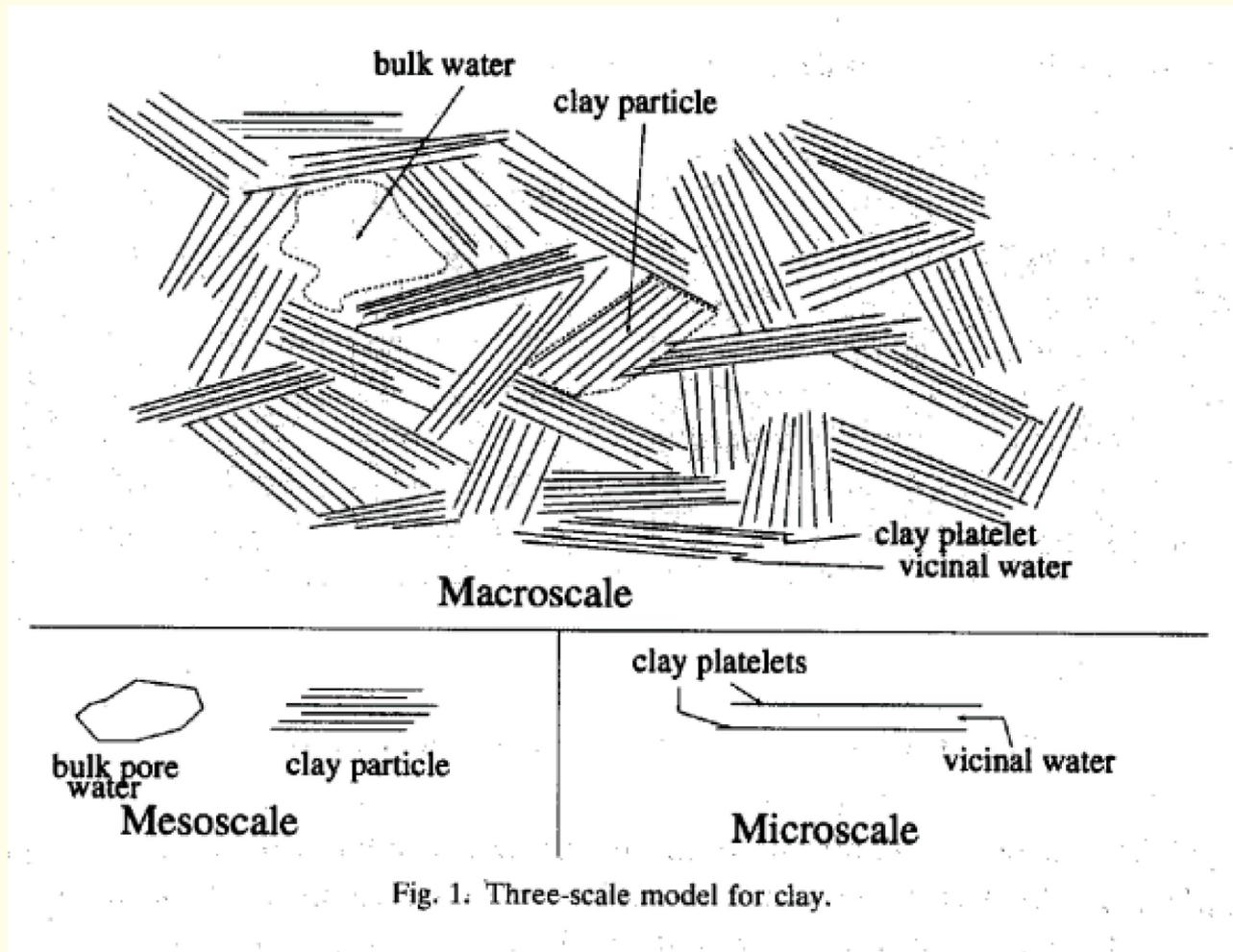
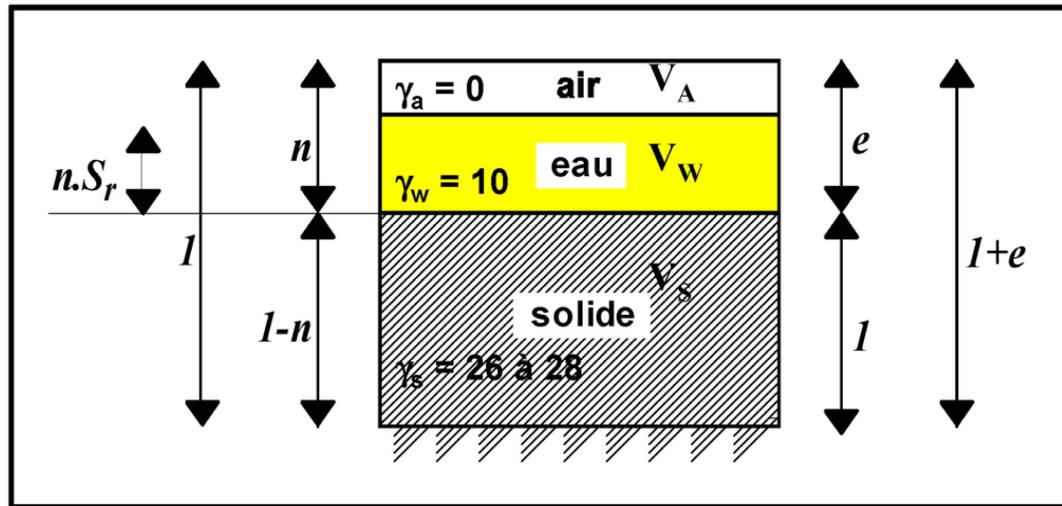


Fig. 1. Three-scale model for clay.

Caractéristiques de l'argile

Paramètres d'état



• Teneur en eau

$$w = \frac{\text{poids d'eau}}{\text{poids de solide}}$$

• Indice des vides

$$e = \frac{\text{volumes des vides}}{\text{volumes des grains}}$$

• Porosité

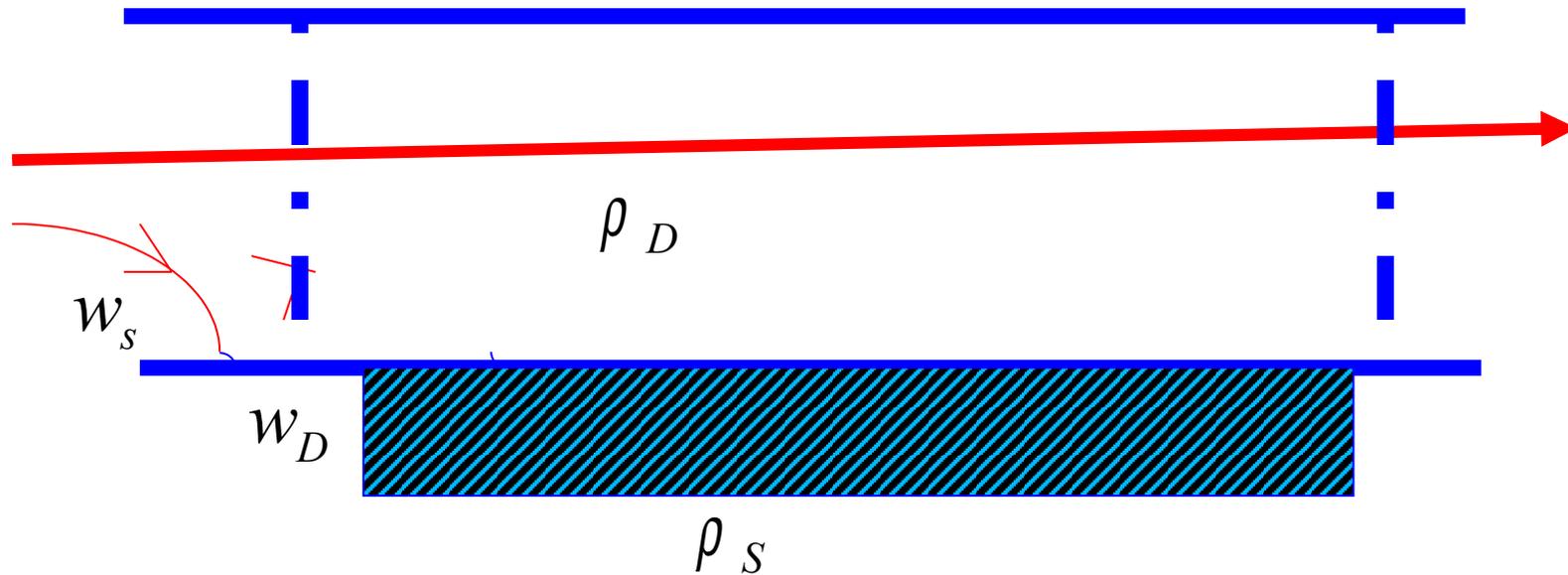
$$n = \frac{\text{volumes des vides}}{\text{volume total}}$$

• Degré de saturation

$$S_r = \text{pourcentage de vides remplis d'eau}$$

Cas d'un élément soluble

La physique du stockage 1



$$w_s \rho_d(x, t) = w_D \rho_s(x, t)$$

$$\rho(x, t) = \rho_D(x, t) + \rho_S(x, t)$$

$$\rho_d(x, t) = \frac{w_d}{w_d + w_s} \rho(x, t)$$

La physique du stockage 2

• Pertes :

La décroissance radioactive : $-\lambda \rho_d(x, t)$, λ taux de désintégration radioactive

$\rho_d(x, t)$ densité linéaire des radioéléments dissous

La sorption par les parois : $-\omega_s \rho_d(x, t)$ où ω_s est le taux de sorption

Les radioéléments entraînés hors du volume : $-\nu \rho_d(x, t)$

où ν est une vitesse de transport

• Les gains sont dus à : $\omega_d \rho_s(x, t)$

ω_d où est le taux de désorption $\rho_s(x, t)$ densité linéaire des radioéléments adsorbés

Les radioéléments entraînés dans le volume par l'eau :

Δ une longueur effective de transport.

La physique du stockage 3

$$\frac{d\rho_d(x,t)}{dt} = v\Delta \frac{d^2\rho_d(x,t)}{dx^2} - \lambda\rho_d(x,t) - w_s\rho_d(x,t) + w_d\rho_s(x,t)$$

$$\frac{d\rho_s(x,t)}{dt} = -\lambda\rho_s(x,t) + w_s\rho_d(x,t) - w_d\rho_s(x,t)$$

Δ

$$\rho = \rho_D + \rho_S \quad D = D_0 \frac{w_d}{w_d + w_s} = \frac{D_0}{R}$$

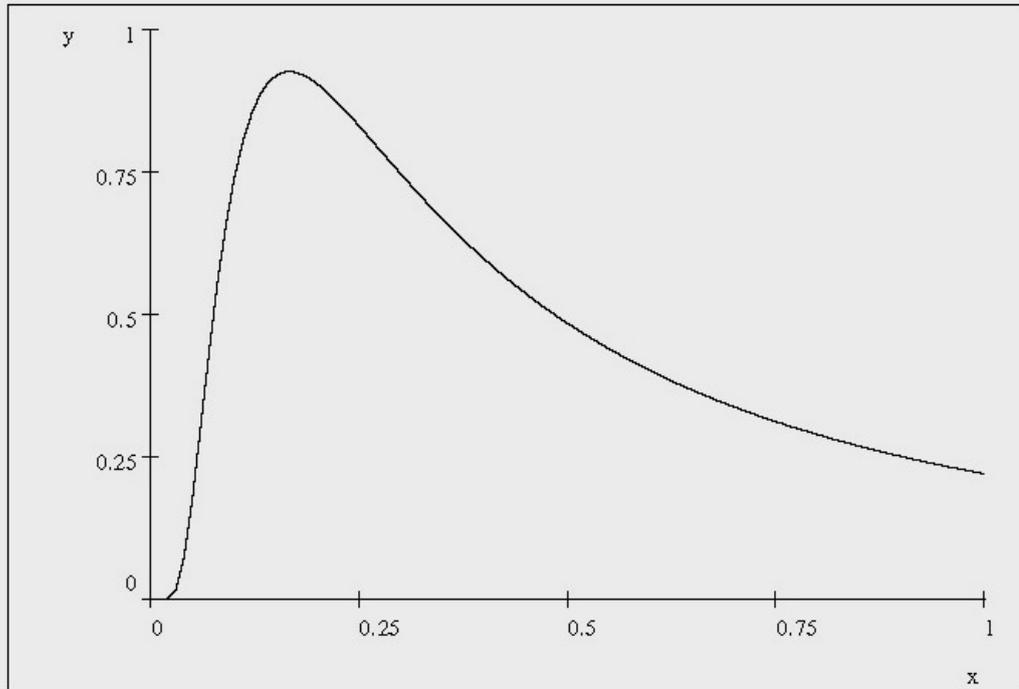
$$\frac{d\rho(x,t)}{dt} = D \frac{d^2\rho(x,t)}{dx^2} - \lambda\rho(x,t) \quad J(x,t) = -D_0 \frac{d\rho_d(x,t)}{dx}$$

La physique du stockage 4

Courant de sortie pour une couche d'épaisseur L

$$L = 1$$
$$D = 1$$

$$f(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi D t}} \times \frac{L}{t} \times \exp - \left(\frac{L^2}{4 D t} \right)$$



$$J(L, t) = \frac{N}{2\sqrt{\pi D t}} \frac{L}{t} e^{-\frac{L^2}{4 D t}}$$

$$\tau_S = \frac{L^2}{6 D}$$

$$\Delta \tau = \frac{L^2}{4 D} = 1.5 \tau_S$$

La physique du stockage 5

$$J(L, t, \lambda) = \frac{N}{2\sqrt{\pi Dt}} \frac{L}{t} e^{-\frac{L^2}{4Dt}} \times e^{-\lambda t}$$

Si $\tau_S \gg \frac{1}{\lambda}$ Disparition du radionuclide avant sortie

Pour l'argile saturée à 20% $D_0 = 1.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{an}$.

Pour L=50m $\tau_S = \frac{L^2}{6D_0} = 260000$ années

La physique du stockage 6

Coefficients de retard et durée de transport

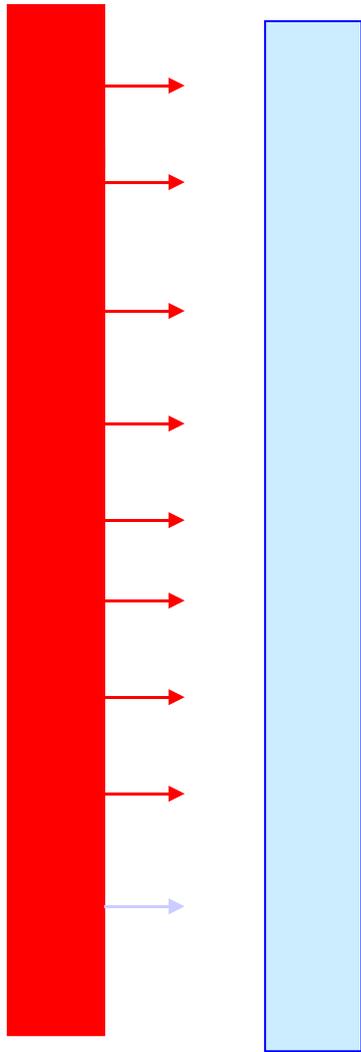
Eléments	Coefficients de retard	Durée de transport années	Période années
I 129	1	260 mille	15 millions
Cs 135	800	200 millions	1,3 millions
U 238	500	130 millions	4,5 milliards
Np 237	1000	260 millions	2,1 millions
Pu 239 (242)	5000	1,3 milliards	24(373) mille
Am 243	2000	560 millions	7,5 mille

La physique du stockage 7

$$L = \sqrt{6DT_{1/2}}$$

Éléments	D	Longueur de parcours m
I 129	$1,6 \cdot 10^{-3}$	155
Cs 135	$2 \cdot 10^{-6}$	2,1
U 238	$3,2 \cdot 10^{-6}$	120
Np 237	$1,6 \cdot 10^{-6}$	2
Pu 239(242)	$3,2 \cdot 10^{-7}$	0,08 (0,34)
Am 243	$0,8 \cdot 10^{-6}$	0,07

Cas d'éléments peu solubles



$$D \frac{d^2}{dx^2} \rho_{stat}(x) - \lambda \rho_{stat}(x) = 0$$

$$J_{\max}(0) = k_s C_{\max} e^{-\sqrt{\frac{\tau_s}{T_{1/2}}}}$$

$$k_s = \omega S \frac{D_0}{L} \frac{\sqrt{\frac{\tau_s}{T_{1/2}}}}{\tanh\left(\sqrt{\frac{\tau_s}{T_{1/2}}}\right)}$$

Densité constante en $x=0$

Coefficients de solubilité

Eléments	Limite de solubilité (Mole/m ³)
Sr	10^{-2}
I	Soluble
Cs	Soluble
U	$3 \cdot 10^{-7}$
Np	$8 \cdot 10^{-7}$
Pu	$8 \cdot 10^{-5}$
Am	$4 \cdot 10^{-5}$

Exemple de l'uranium

$$J_{\max}(0) = k_s C_{\max} e^{-\sqrt{\frac{\tau_s}{T_{1/2}}}} \quad \frac{\tau_s S}{T_{1/2}} = 2.9 \times 10^{-2}$$

Barre d'uranium 200x10x10 cm, 400 kg $\omega = 0.1$ $S = 0.82 \text{ m}^2$

$$k_s = 2.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{an} \quad C_{\max} = 3 \cdot 10^{-7} \text{ moles} / \text{m}^3 \quad \text{Eau basique}$$

$$J(L = 50) = 7 \cdot 10^{-13} \text{ mole} / \text{an} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ kg} / \text{an}$$

$$\text{Activité pour une barre de 400 kg} \quad A = 2.6 \cdot 10^{-6} \text{ Bq}$$

$$\text{Pour 100000 tonnes} \quad A = 0.5 \text{ Bq}$$

$$\text{Concentration eau de mer} \quad C_{\max} = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ moles} / \text{m}^3 \quad A = 25 \text{ Bq}$$

Radiotoxicités

Noyau	Demie vie	Facteur de Dose	Activité	Radiotoxicité
	(années)	(Sv/Bq)	(Bq/Kg)	(Sv/Kg)
129 I	$0.157 \cdot 10^8$	$0.11 \cdot 10^{-6}$	$6.5 \cdot 10^9$	$0.7 \cdot 10^3$
135 Cs	$0.230 \cdot 10^7$	$0.20 \cdot 10^{-8}$	$4.2 \cdot 10^{10}$	$0.8 \cdot 10^2$
237 Np	$0.214 \cdot 10^7$	$0.11 \cdot 10^{-6}$	$2.6 \cdot 10^{10}$	$0.3 \cdot 10^4$
239 Pu	$0.241 \cdot 10^5$	$0.25 \cdot 10^{-6}$	$2.3 \cdot 10^{12}$	$0.6 \cdot 10^6$
240 Pu	$0.656 \cdot 10^4$	$0.25 \cdot 10^{-6}$	$8.3 \cdot 10^{12}$	$2.1 \cdot 10^6$
242 Pu	$0.373 \cdot 10^6$	$0.24 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{11}$	$0.4 \cdot 10^5$
243 Am	$0.737 \cdot 10^4$	$0.20 \cdot 10^{-6}$	$7.4 \cdot 10^{12}$	$1.5 \cdot 10^6$

Doses reçues

Exemple : 100000 tonnes de combustible irradié, 20 tonnes d'iode, 10^{14} Bq

L'iode est rejetée pendant 400000 ans. Le rejet d'iode au maximum a une activité de $6 \cdot 10^7$ Bq. Correspondant à une dose collective de 6 Sv.

Une fraction α de cette dose est absorbée par chaque individu.

Supposons un débit de nappe phréatique de 1 million de m^3 /an (30 l/s)
(la nappe de Vizille permet de pomper 20 millions de m^3)

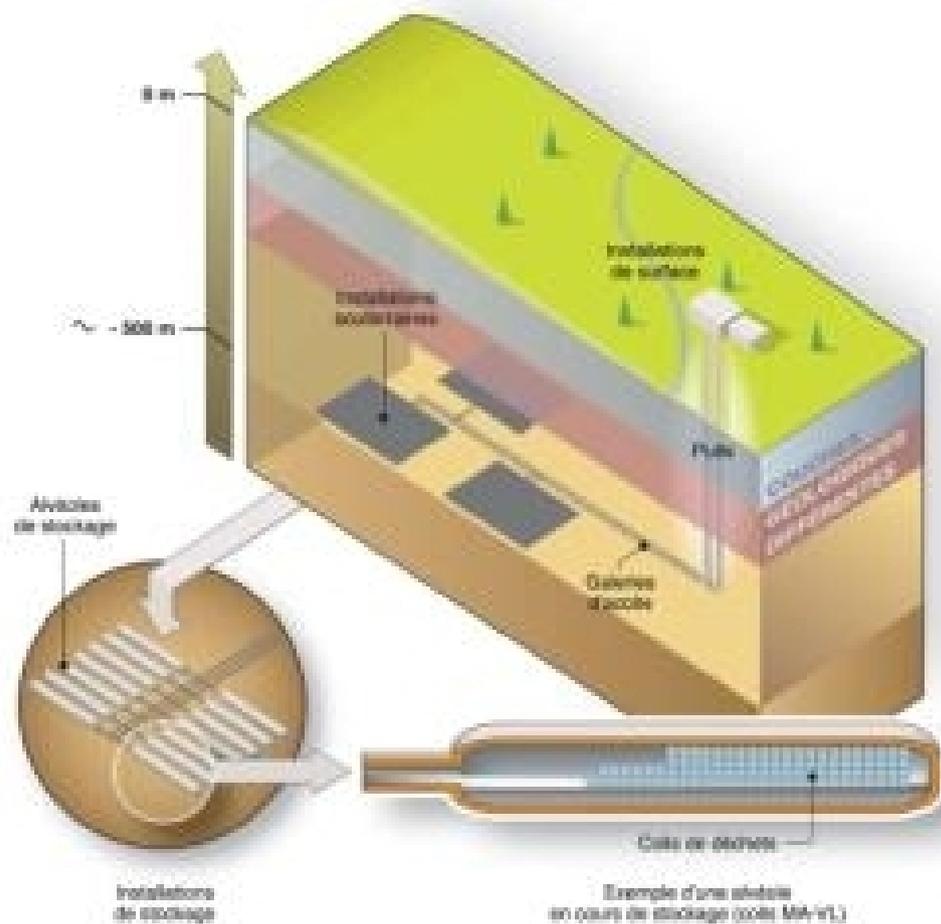
Supposons qu'un individu boit 5 l/jour, soit environ 2000 l/an

La dose reçue par l'individu vaut alors

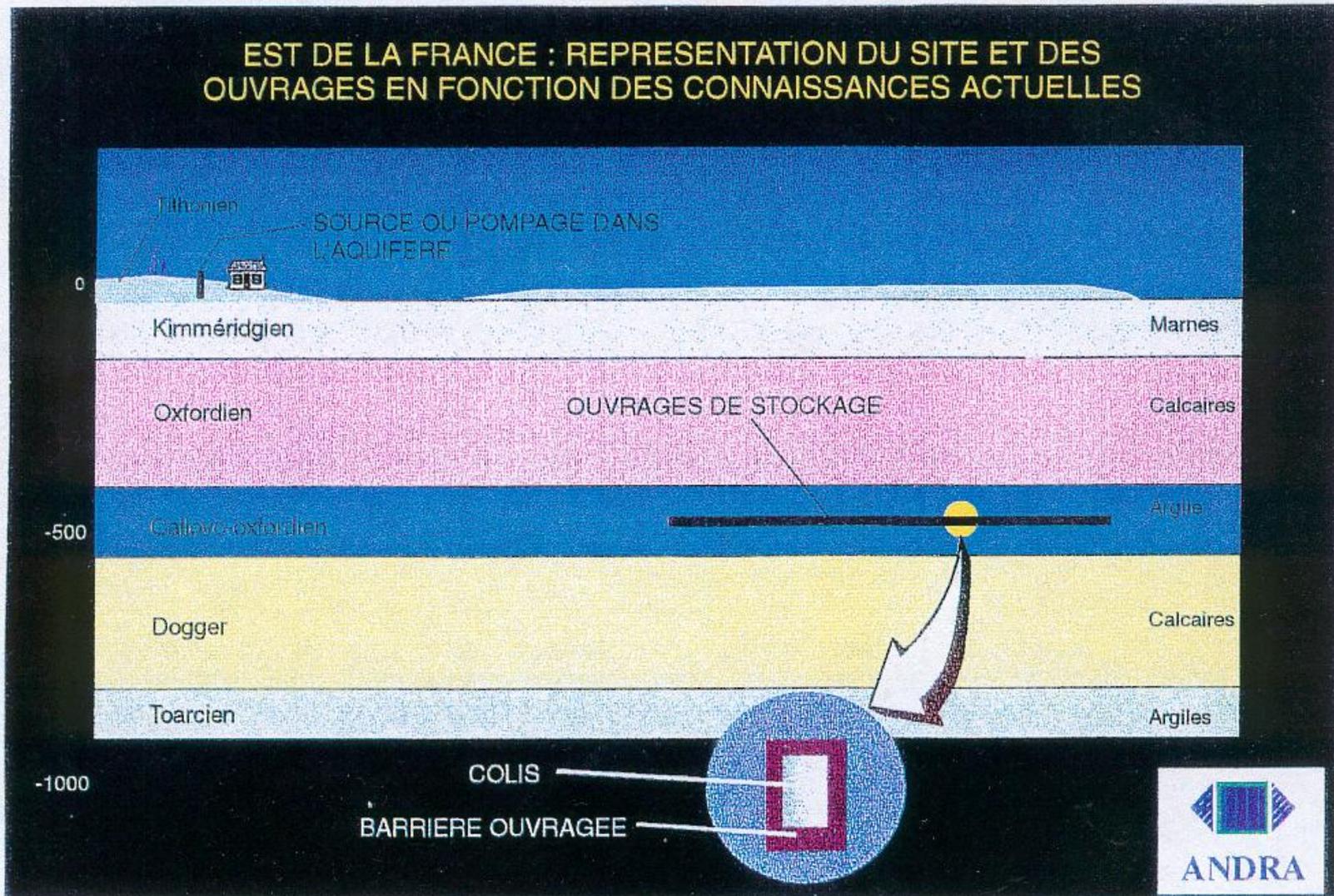
$$Y = 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ mSv}$$

Schéma de stockage

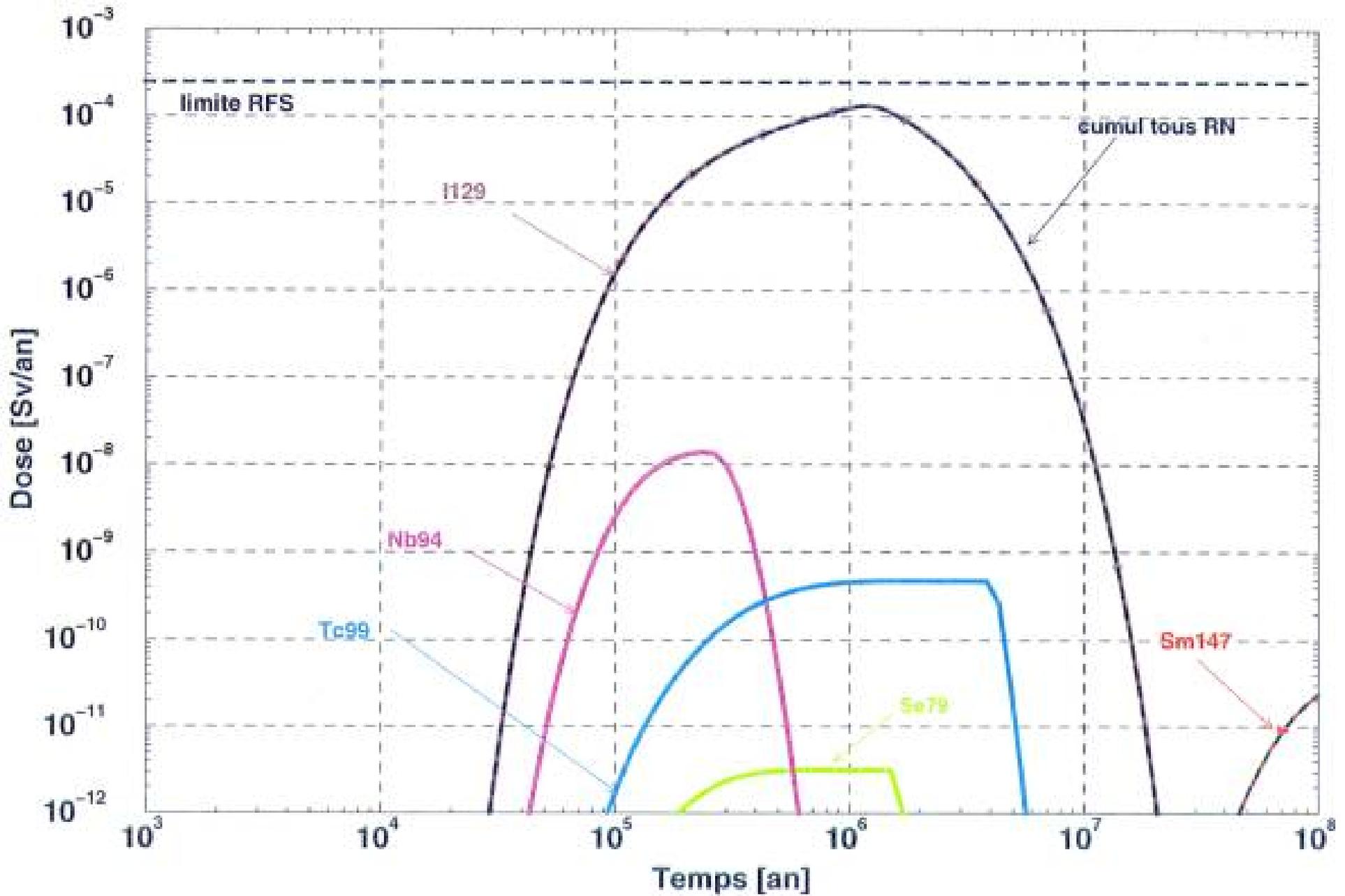
Le stockage en couches géologiques profondes



Stockage



Rejets calculés



modèle d'Oklo

réacteurs naturels d'Oklo

Il y a 2 milliards d'années

Uranium 235 concentration: 8% (vs 0,7%)

Eau très riche en sels d'uranium

Haute pression

Bouffées de réactions en chaîne pendant plusieurs millions d'années

Le Plutonium a très peu bougé.

