

Problèmes associés au nucléaire

- Catastrophes
- Prolifération Nucléaire
- Déchets Nucleaires
 - Production
 - Stockage
 - Transmutation

Catastrophes

TMI

- Erreur des opérateurs
- Fusion du coeur
- Dégagement de H₂
- Déflagration dans l'enceinte
- Pas de rejets significatifs
- Fin de la construction de centrales aux USA

Catastrophes: Tchernobyl, TMI

Grand volume des RBMK

Comparaison REB - RBMK

	Ignalina	REB (GE)
Puissance MWt	4800	3800
Diamètre cœur m	11,8	5
Hauteur cœur m	7	3,8
Volume cœur m³	824	75
MW/m³	5,8	51
MW/t combustible	25,4	24,6

Causes de l'accident du 28 avril 1986

test de sûreté!



Les causes de l'accident du 28 avril 1986

▶ *Les causes liées au type du réacteur :*

- ◆ *Effet de vidange*
- ◆ *Effet Xénon*
- ◆ *Barres de contrôle et taille de cœur*
- ◆ *Confinement par casemates*

▶ *Les actions des opérateurs :*

- ◆ *L'expérience de sûreté*
- ◆ *La demande du réseau ukrainien*
- ◆ *La proximité du week-end du 1er Mai*
- ◆ *Les violations successives*



L'accident

L'ampleur réelle de l'accident (5-09-05)

- ▶ **Rapport « Chernobyl Legacy : Health, Environmental and Socio-Economic Impacts »**
- ▶ **FORUM CHERNOBYL : ~100 scientifiques, économistes et médecins.**
 - ◆ **8 agences des Nations Unies : AIEA, OMS, PNUD, FAO, PNUE, Office des Affaires Humanitaires, UNSCEAR et Banque Mondiale.**
 - ◆ **Gouvernements de Belarus, Fédération de Russie et Ukraine**
- ▶ **250 pages et communiqué de 13 pages avec Q&A**

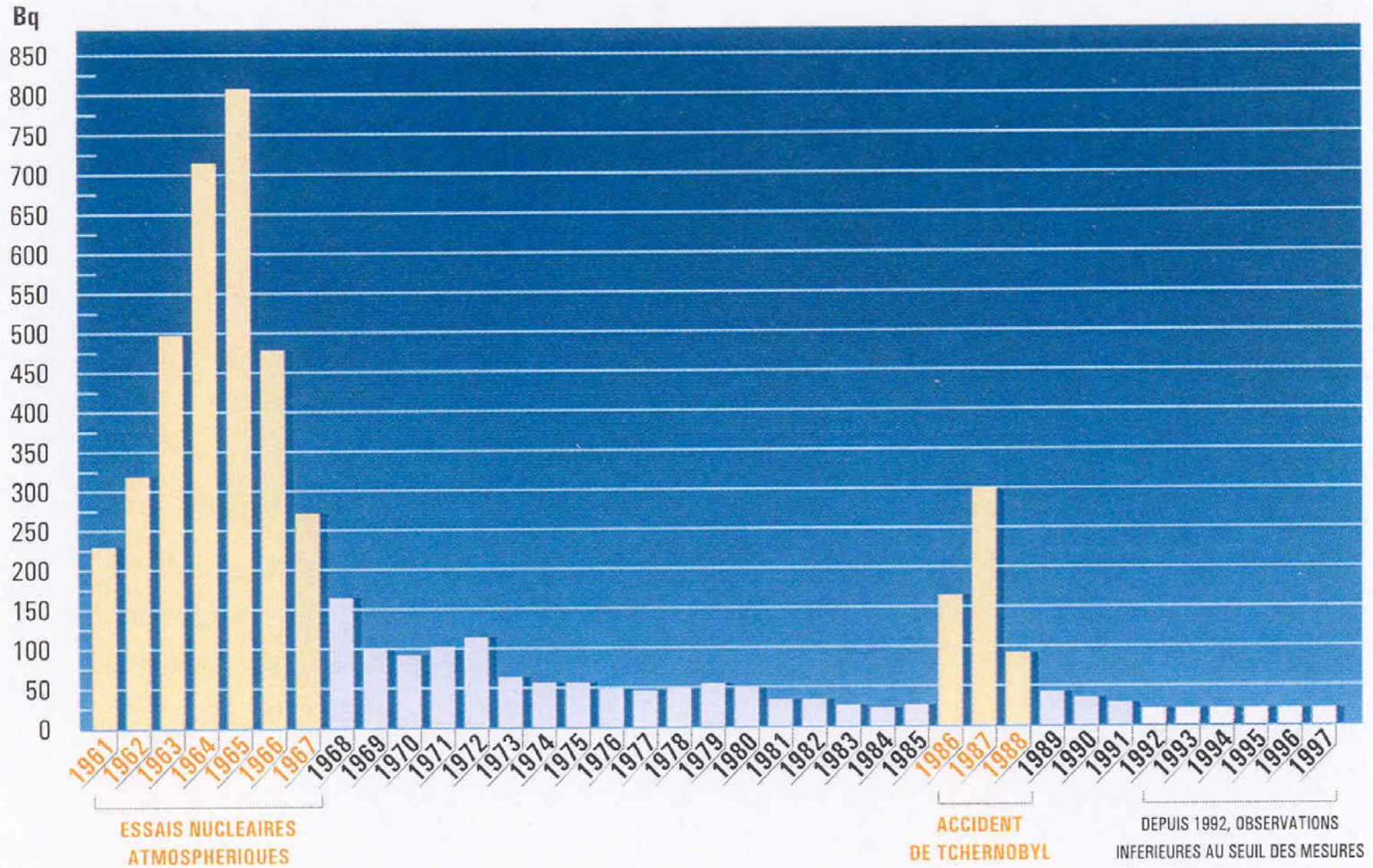
Conséquences fin 2004

- ▶ **Une cinquantaine de morts dans les équipes d'intervention, par syndrome d'irradiation aiguë**
- ▶ **9 morts parmi les ~4000 patients (essentiellement des enfants) atteints d'un cancer de la thyroïde**
- ▶ **5 millions d'habitants en zone « contaminée », dont 100 000 reçoivent des doses > limite autorisée au public (mais < bien des zones « naturelles »)**
- ▶ **350 000 personnes évacuées (dont 240 000 sans bénéfice radiologique)**
- ▶ **Evacuation très traumatisante. Désordres mentaux, désespérance, « fatalisme paralysant », etc.**

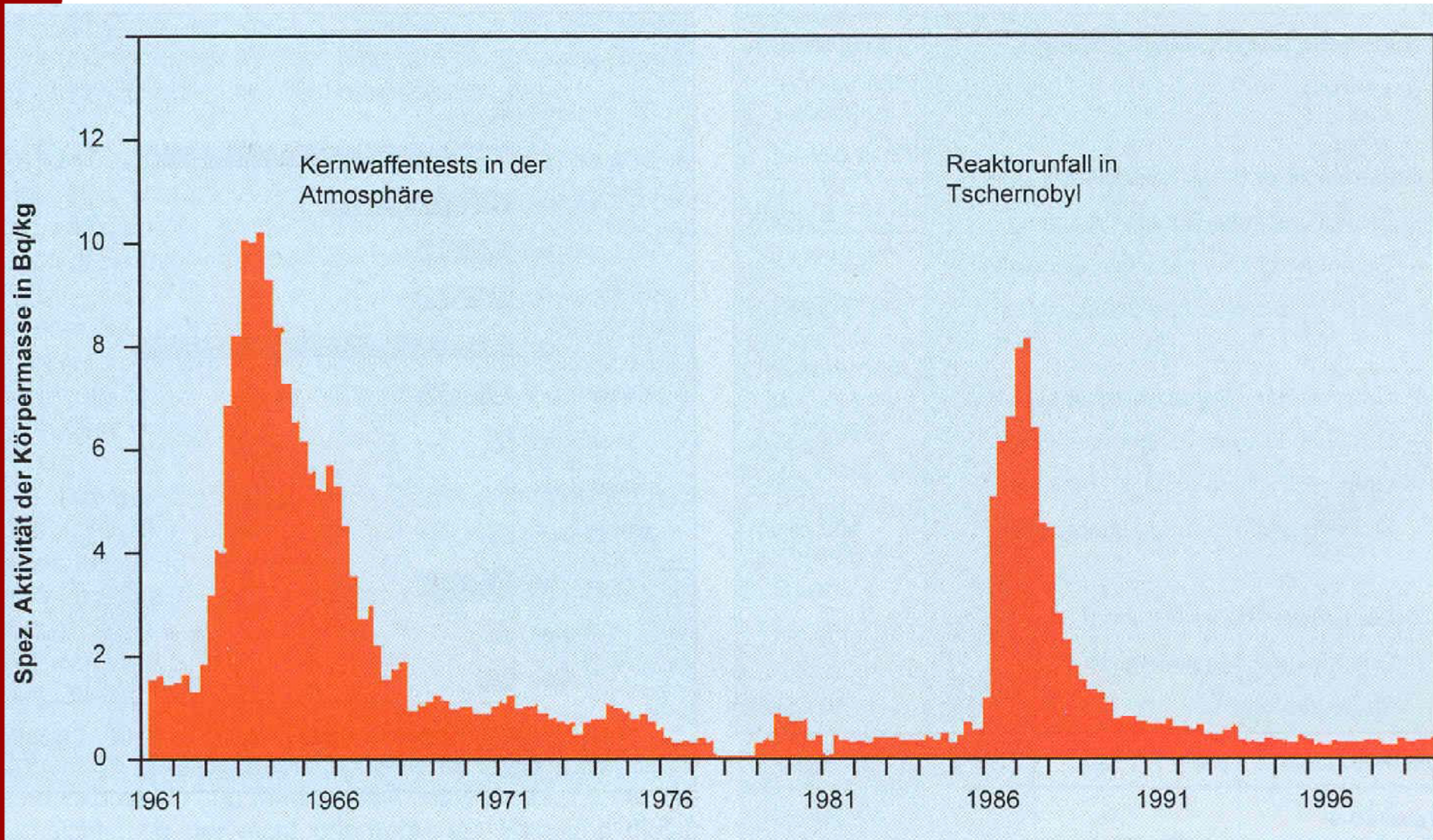
Conséquences sanitaires ultimes

- ▶ Les experts internationaux ont estimé que les rayonnements pourraient provoquer à terme **jusqu'à 4000 décès** chez les populations (600 000 personnes) les plus exposées après l'accident : équipes d'intervention en 86-87, personnes évacuées et résidants des zones les plus contaminées.
- ▶ Un quart de la population mourra d'un cancer spontané « naturel » : l'augmentation due à Tchernobyl sera de **3%** (difficile à observer sauf sur les cohortes les plus exposées)

Conséquences de Tchernobyl à Paris (Bq ¹³⁷Cs par individu)



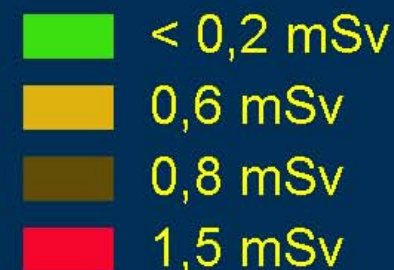
Source IPSN



conséquences de l'accident de Tchernobyl en France

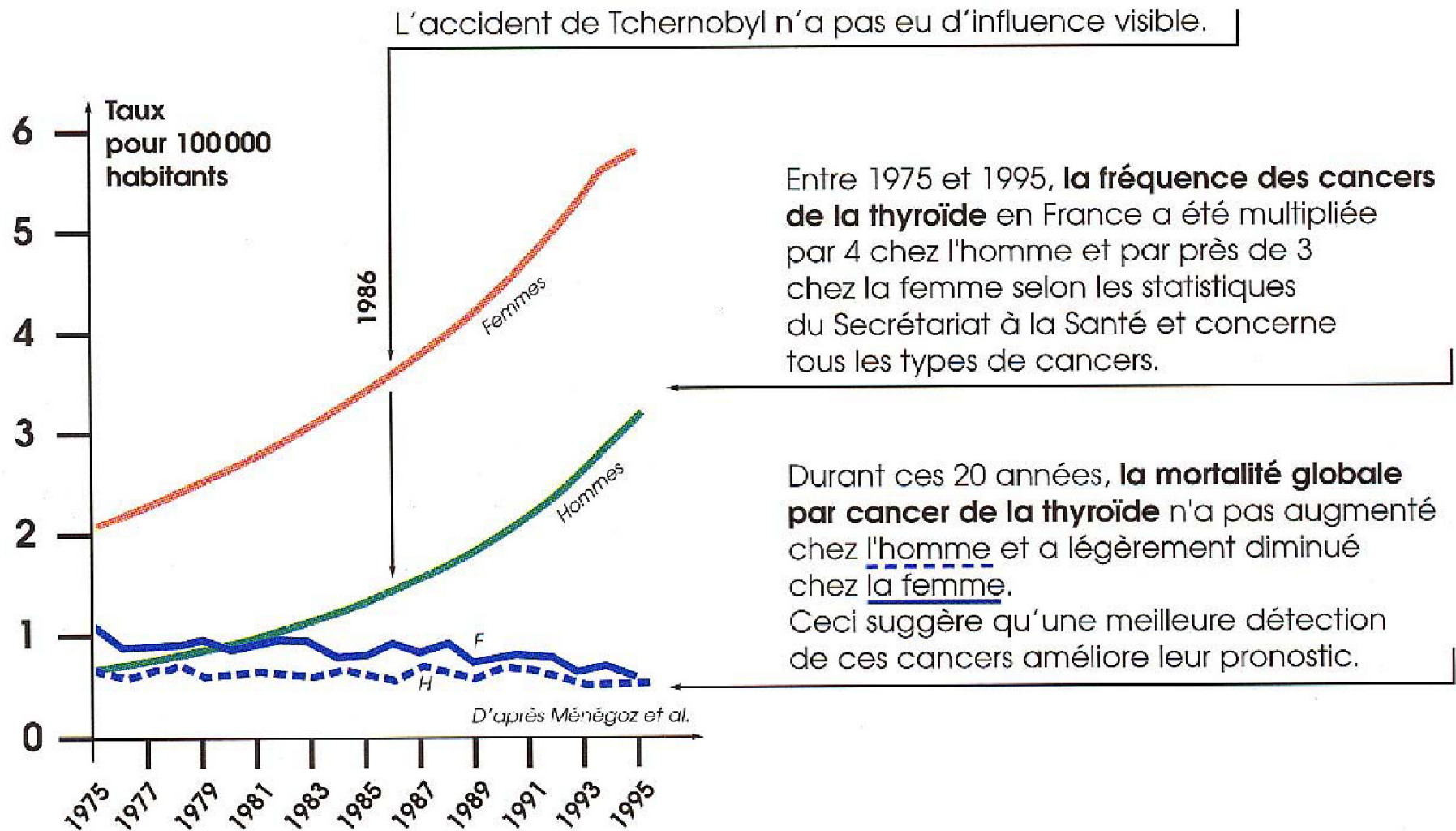
- dose efficace globale maximale (IPSN)

1986	0,4 mSv	(2,5 mSv*)
1987-1996	0,7 mSv	(25 mSv*)
1997-2046	0,4 mSv	(125 mSv*)
<hr/>		
total / 60 ans	1,5 mSv	(150 mSv*)



* irradiation naturelle à Paris

Cancers de la thyroïde en France



» Source : IRSN, Institut Gustave Roussy

LE DERNIER COUP DES «TELEPHONE»: «ADIEU»

C'était le seul groupe opérationnel de la décennie « rock français » (76-86). Autarcique, adulé, lycéen et vendeur à mort. Au moment où le groupe enfonçait ses propres records avec l'album « Un Autre Monde », il s'est séparé. Bilan et perspectives pages 26 à 28.

NELLE SERIE N° 1540

4,90 F • VENDREDI 2 MAI 1986

Libération

Un diplomate de Moscou admet que l'

TCHERNOBYL LE CHOC D'

L'accident n'est pas encore
liquidé... une semaine après

le une baisse sensible de la radioactivi-
té a
gue **Page 4, colonne 1** e vo-
vie, osla-

Monaco a enregistré des traces de particules peu fréquentables dans l'atmosphère (minimes et ne présentant aucun danger selon les respon-
bles), puis, finalement, cela a été au tour de la France. Pierre Pellerin, le directeur du service central de protection contre les radiations ionisantes (SCPRI) a annoncé hier que l'augmentation de radioactivité était enregistrée sur l'ensemble du territoire, sans aucun danger pour la santé. Un avion d'Air France a relevé des traces

radioactives à 20 km au nord de Montélimar hier à 13h15. Mais « la légère hausse de la radioactivité décelée dans le Sud-Est n'est pas significative », selon le SCPRI. Pas de panique dans

AP

SPORTS

MONACO: PROST DEGUSTE SON BIG MAC LAREN

Alain Prost a remporté sa troisième victoire consécutive au Grand Prix de Formule 1 à Monaco après avoir fait la course en tête. Mac Laren se félicite les mains, car son coéquipier Rosberg prend la 2e place. Lire notre supplément pages 19 à 24.

NELLE SERIE N° 1548

1,90 F. LUNDI 12 MAI 1986

Libération

Attentat contre Marks et Spencer: un suspect sous les verrous

Souçonné d'avoir posé la bombe contre le magasin parisien de Marks and Spencer en février 85 (un mort). Habib Maamar a été arrêté à Nancy. Un coup de filet chanceux, dû aux révélations de l'amie du suspect. Lire page 16.

Le nuage radioactif de Tchernobyl a bien survolé une partie de l'Hexagone



LE MENSONGE RADIOACTIF

Les pouvoirs publics en France ont menti, le nuage radioactif de Tchernobyl a bien survolé une partie de l'Hexagone: le professeur Pellerin en a fait l'aveu deux semaines après l'accident nucléaire. Deux ministres, Alain Madelin et Alain Carrignon, tous deux directement en cause, ont annoncé pour aujourd'hui la création d'une « Cellule d'information ». Autre aveu, celui des autorités soviétiques: il n'y

aurait plus depuis hier, dimanche, « de possibilités théoriques de catastrophe ».

Autrement dit, depuis 15 jours le monde vivait sur un volcan...

Enfin, c'est aujourd'hui que les ministres des Affaires étrangères de la CEE doivent se prononcer sur le blocus des produits alimentaires en provenance des pays de l'Est... sur fond de guerre commerciale. Lire pages 2 à 6.

12 Mai 1986

tion ».

« dans la centrale, l'incendie est totale-

cules spectraux telecommandes par ra-

KOIAT KYJKOV, et le numero deux au

Le nuage a «tout juste frôlé» l'Est de la France

La France apparaît comme l'un des rares pays d'Europe occidentale miraculeusement épargné par les retombées radioactives de Tchernobyl. Alors que l'Autriche annonçait hier soir la suspension sur tout son territoire de la vente de légumes frais — légumes à feuilles, mais aussi haricots, petit pois et tomates —, ainsi que la suspension de l'importation de légumes en provenance de huit pays étrangers ; alors que les Allemands et les Italiens ont été priés de ne plus consommer de lait et de légumes frais, l'hexagone semble échapper au fléau.

Hier, la Direction de la qualité au ministère de l'Agriculture a indiqué que les taux de radioactivité des produits agricoles en France sont tout

simplement «normaux». La raison ? Le nuage radioactif en provenance d'Union soviétique a « tout juste frôlé » la frontière Est du pays. Les analyses faites sur le lait et la viande ne font apparaître aucune hausse du taux de radioactivité, affirme le ministère. Le laboratoire central d'hygiène alimentaire et ses satellites dans les départements exercent, rappelle-t-on, un contrôle permanent comportant une observation des teneurs en iode, en métaux lourds et en radioactivité des produits de la mer, du lait et de la viande. Ce qui permet au ministère de l'Agriculture d'affirmer qu'il n'y a pas lieu, en l'état actuel des choses, d'interdire la consommation de lait et de légumes frais.

Même son de cloche au Service

central de protection des rayonnements ionisants (SCPRI) qui, depuis plusieurs jours, continue d'affirmer qu'il ne se pose en France « aucun problème significatif d'hygiène publique » à la suite de la catastrophe de Tchernobyl. Il est vrai que le célèbre anticyclone des Açores a amené le soleil sur le pays au moment décisif, et que les vents ont d'une certaine façon « tourné autour », d'abord vers l'ouest-nord-ouest, ensuite vers le sud.

Pourtant, des interrogations demeurent. Pourquoi le ministère de l'Agriculture se borne-t-il à indiquer que des certificats de contrôle « pourraient » être exigés pour l'importation de produits alimentaires « provenant des régions européennes contami-

nées », alors qu'en Autriche par exemple, la suspension des importations a été décidée « en raison des niveaux élevés de radiation » ? Pourquoi est-il si difficile aux journalistes d'obtenir des responsables du SCPRI au bout du fil, et doivent-ils attendre que l'on réponde à leurs questions par un texte écrit ?

Si le beau temps a réellement sauvé la France, si les communiqués rassurants n'ont rien à voir avec la volonté de ne pas faire de peine aux agriculteurs français, tout le monde s'en réjouira. Mais s'il n'y a rien à cacher, que l'on cesse de donner l'impression contraire.

Sélim NASSIB

Prolifération

Prolifération 1

1. Prolifération: techniques
 1. Production ^{235}U
 1. Electromagnétique
 2. Diffusion
 3. Centrifugation
 4. Masse critique
 2. Plutonium ^{239}Pu
 1. REP
 2. CANDU
 3. Réacteurs expérimentaux
 4. Retraitement
 5. Mass critique

Prolifération 2

Techniques de surveillance

- Satellites
- Inspections
- NPT

Question technique ou politique?

Déchets Nucléaires

- Production
- Stockage Géologique
- Transmutation

Production

Principaux déchets

Surtout dans les combustibles usés

Principaux noyaux radioactifs :

- Produits de Fission : **radioactivité β**
- Résultant de la capture de neutrons par
Les noyaux fissiles et fertiles: **actinides**
 - uraniums and plutonium
 - Actinides Mineurs : neptunium, américium, curium**radioactivité alpha et beta**

Combustibles Irradiés

Production annuelle pour 1 PWR 1Gwe

- Uranium(5 milliards d'années) : 30 tonnes
- Plutonium(24000 ans): 0,3tonne
- $^{90}\text{Sr}+^{137}\text{Cs}$ (30 ans) : 50 kg
- LLFP (^{129}I , ^{99}Tc , ^{90}Zr ...) 60 kg

Par comparaison avec une centrale à charbon:

- 8 millions de tonnes de CO₂
- 4 tonnes d'Uranium
- 10 tonnes de Thorium

Radio-toxicités

- L'effet radiobiologique d'un radioélément est mesuré par sa radio-toxicité:

$$R \text{ (Sv)} = F_d \text{ (Sv / Bq)} \text{ Activité (Bq)}$$

$$\text{Activité/Kg} = \frac{1.310^{19}}{T_{1/2}(\text{années})A(\text{g})}$$

- Les émetteurs Alpha sont beaucoup plus radio-toxiques que les émetteurs beta
- Les PF sont émetteurs beta
- Les Actinides sont surtout émetteurs alpha
- La fission réduit la radio-toxicité

Radio-toxicités

Noyau	Mode	F_d Sv/Bq	Activité Bq/Kg	Toxicité Sv/Kg
^{99}Tc	β	$0.78 \cdot 10^{-9}$	$6.3 \cdot 10^{11}$	$4.9 \cdot 10^2$
^{135}Cs	β	$0.20 \cdot 10^{-8}$	$4.2 \cdot 10^{10}$	$0.8 \cdot 10^2$
^{237}Np	α	$0.11 \cdot 10^{-6}$	$2.6 \cdot 10^{10}$	$0.3 \cdot 10^4$
^{233}U	α	$0.25 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{11}$	$0.9 \cdot 10^5$
^{238}Pu	α	$0.23 \cdot 10^{-6}$	$6.3 \cdot 10^{14}$	$1.4 \cdot 10^8$
^{239}Pu	α	$0.25 \cdot 10^{-6}$	$2.3 \cdot 10^{12}$	$0.6 \cdot 10^6$
^{240}Pu	α	$0.25 \cdot 10^{-6}$	$8.3 \cdot 10^{12}$	$2.1 \cdot 10^6$
^{241}Pu	β	$0.47 \cdot 10^{-8}$	$3.8 \cdot 10^{15}$	$1.8 \cdot 10^7$
^{242}Pu	α	$0.24 \cdot 10^{-6}$	$1.5 \cdot 10^{11}$	$0.4 \cdot 10^5$
^{241}Am	α	$0.20 \cdot 10^{-6}$	$1.3 \cdot 10^{14}$	$0.3 \cdot 10^8$
^{243}Am	α	$0.20 \cdot 10^{-6}$	$7.4 \cdot 10^{12}$	$1.5 \cdot 10^6$
^{243}Cm	α	$0.20 \cdot 10^{-6}$	$1.9 \cdot 10^{15}$	$0.4 \cdot 10^9$
^{244}Cm	α	$0.16 \cdot 10^{-6}$	$3.0 \cdot 10^{15}$	$0.5 \cdot 10^9$
^{245}Cm	α	$0.30 \cdot 10^{-6}$	$6.3 \cdot 10^{12}$	$1.9 \cdot 10^6$

Stockage Géologique

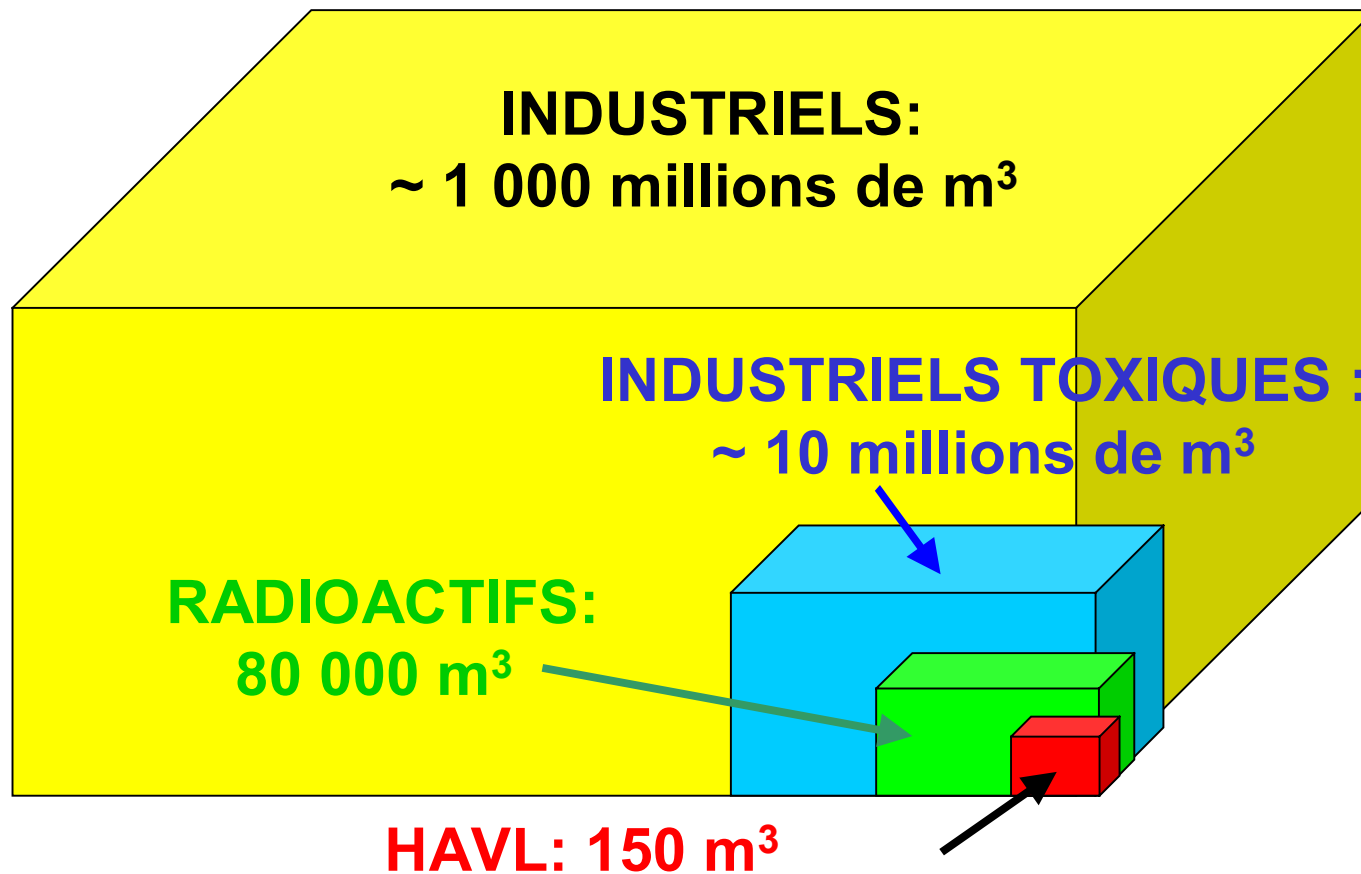
Evaluation globale

- 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



ACTIVITE DANS 1t DE COMBUSTIBLE USE

**Activity in one ton of irradiated fuel
after 3 cycles in reactor
(no reprocessing)**

After 10 years cooling, total activity : $5 \cdot 10^5$ 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		

After 1000 ans : $5 \cdot 10^2$ Ci/t

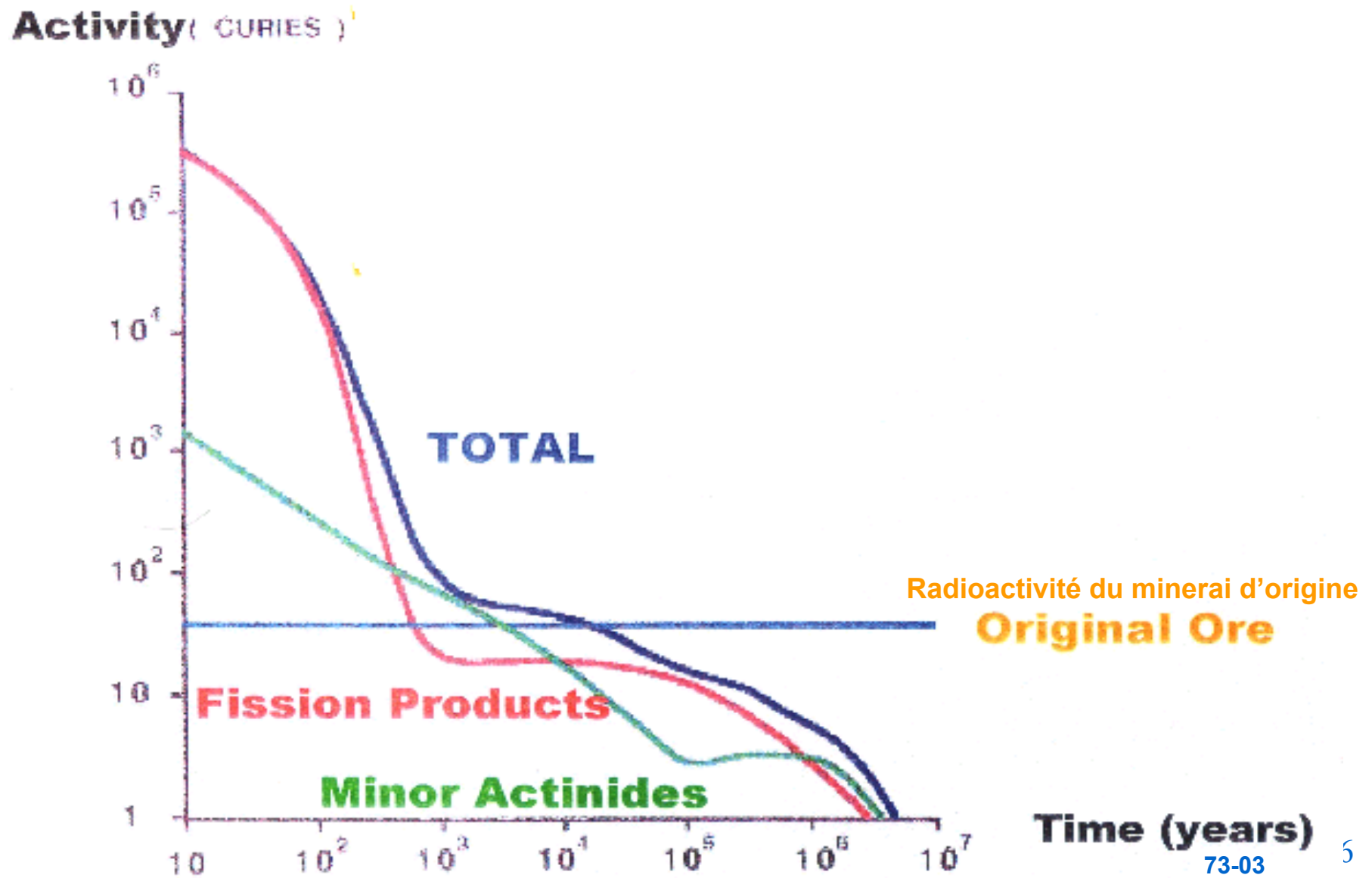
Cs 137 and Sr 90 have disappeared, activity is 1000 times less

2002

After 100 000 years : 50 Ci/t

**Am 241 has disappeared, activity is 10 000 times less
95% from plutonium**

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

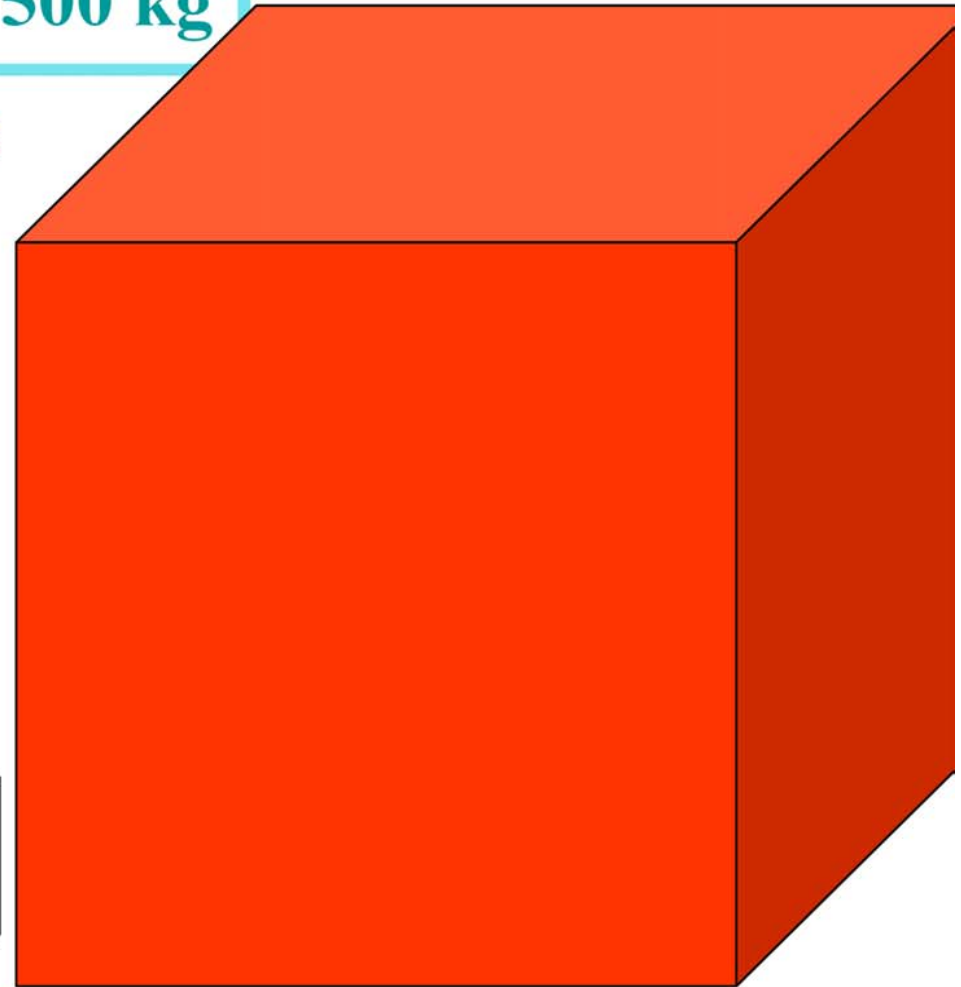
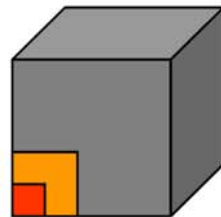
Déchets industriels : 2 500 kg

dont déchets toxiques :
100 kg

Déchets nucléaires
moins de 1 kg

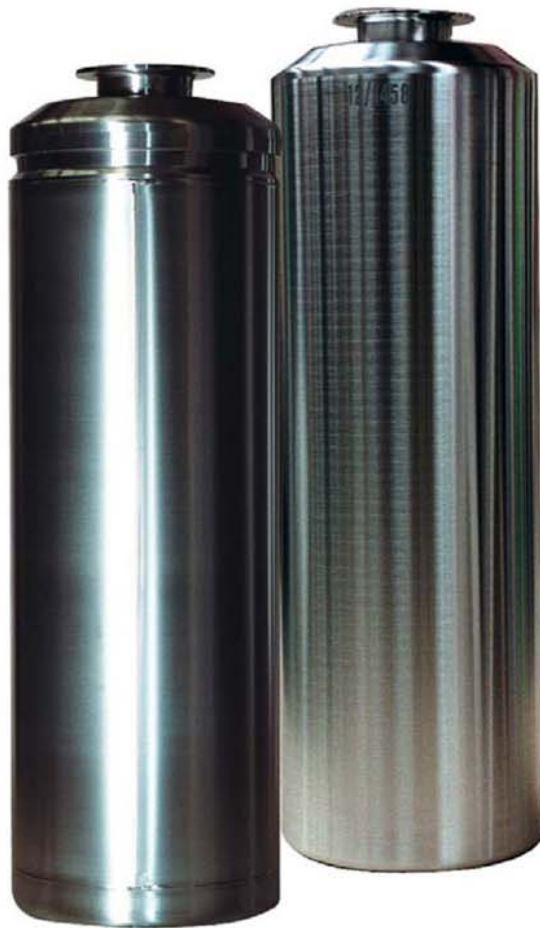
dont vie longue : 100g

dont HA : 10g



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

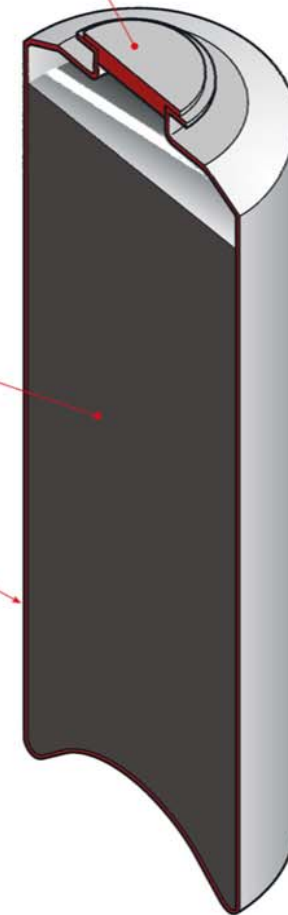
Conditionner pour le très long terme les déchets ultimes : Les Résidus vitrifiés



Couvercle extérieur (soudé)

Verre (produits
de fission vitrifiés)

Parois inox



Containeurs 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/cm²
Puissance Thermique :	2 kW initial

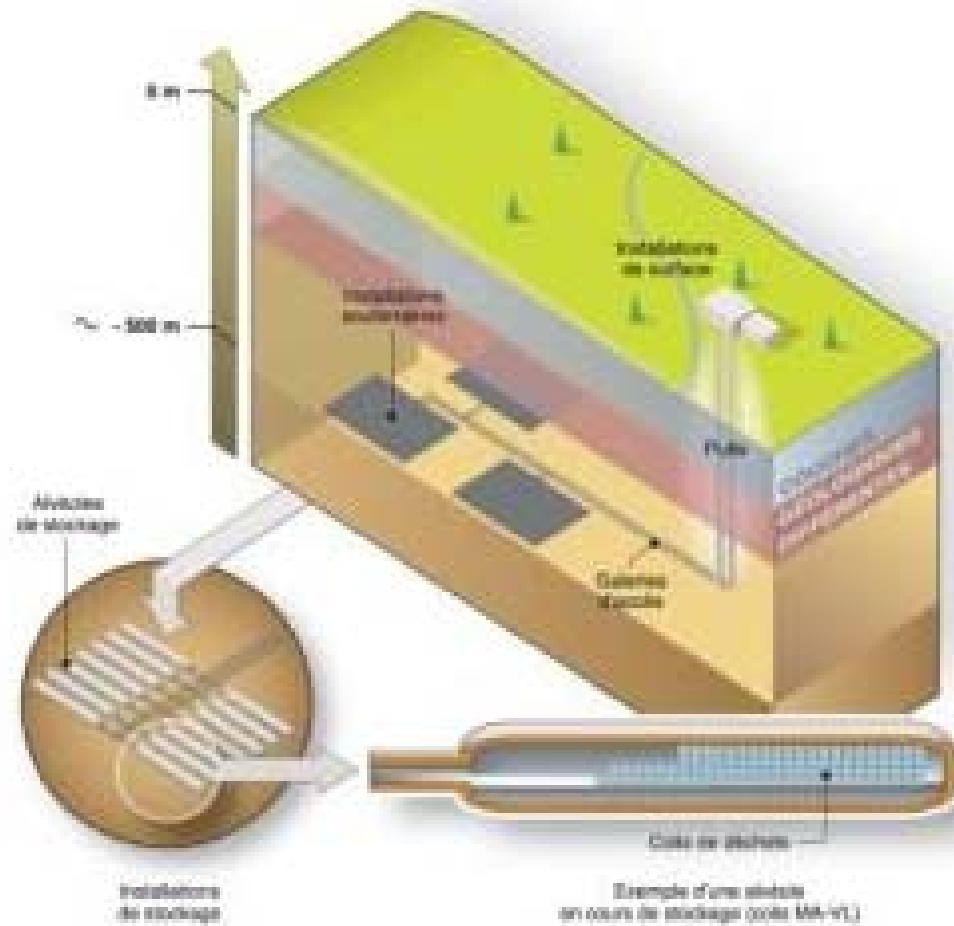
Un 1300 MW « produit » 25 conteneurs par an.

Principe du stockage géologique

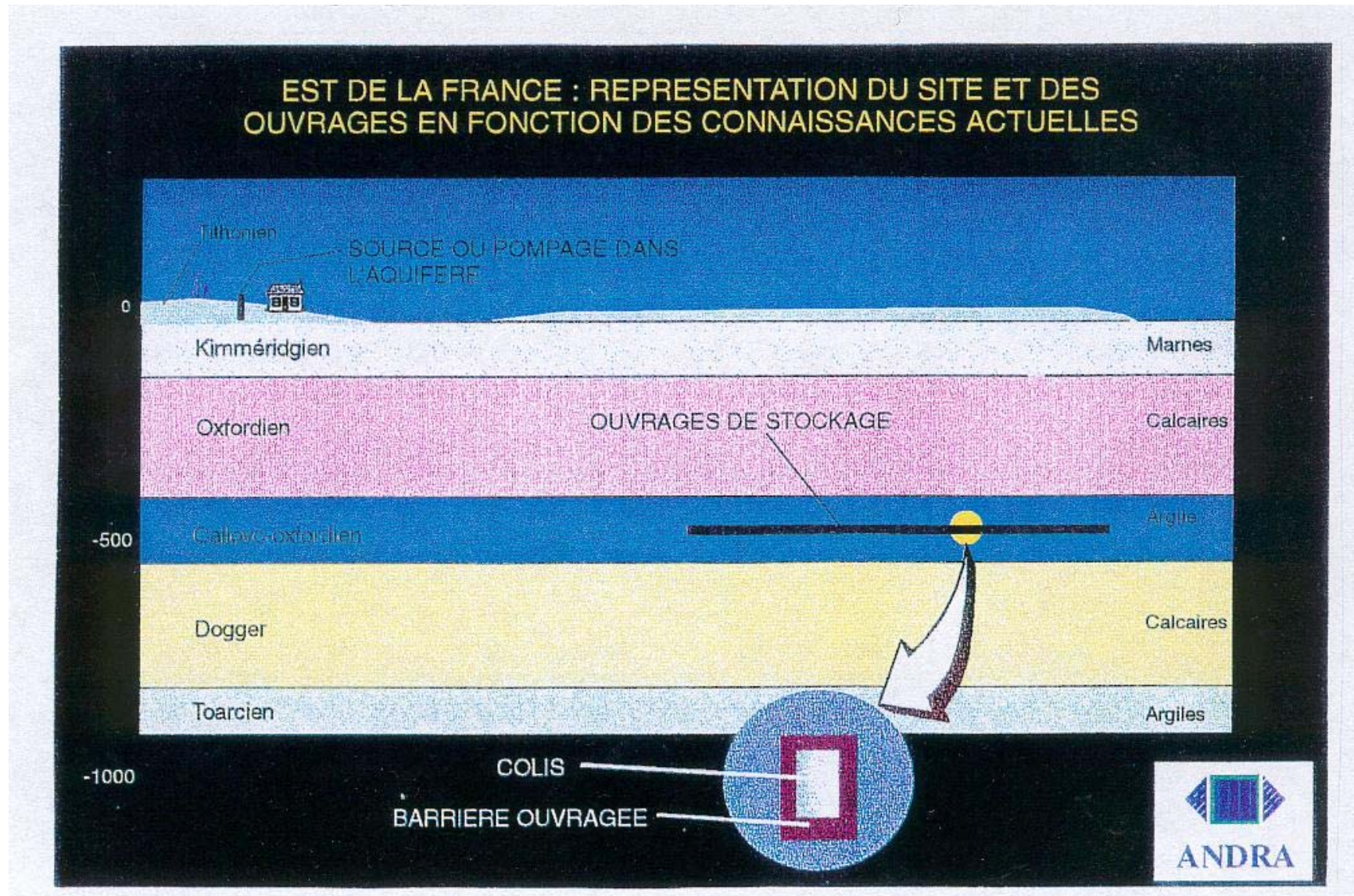
- Trois barrières:
 1. Le conteneur
 2. L'alvéole
 3. La couche géologique
- Principe du transfert radionuclide(Bures)
 - Retard à l'arrivée de l'eau sur les conteneurs **t>1000 ans**
 - Corrosion de l'enveloppe **t>10000 ans**
 - Dissolution du conteneur
 - ✓ Verres **t>100000 ans** (1 millions d'années?)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

Schéma de stockage

Le stockage en couches géologiques profondes



Stockage

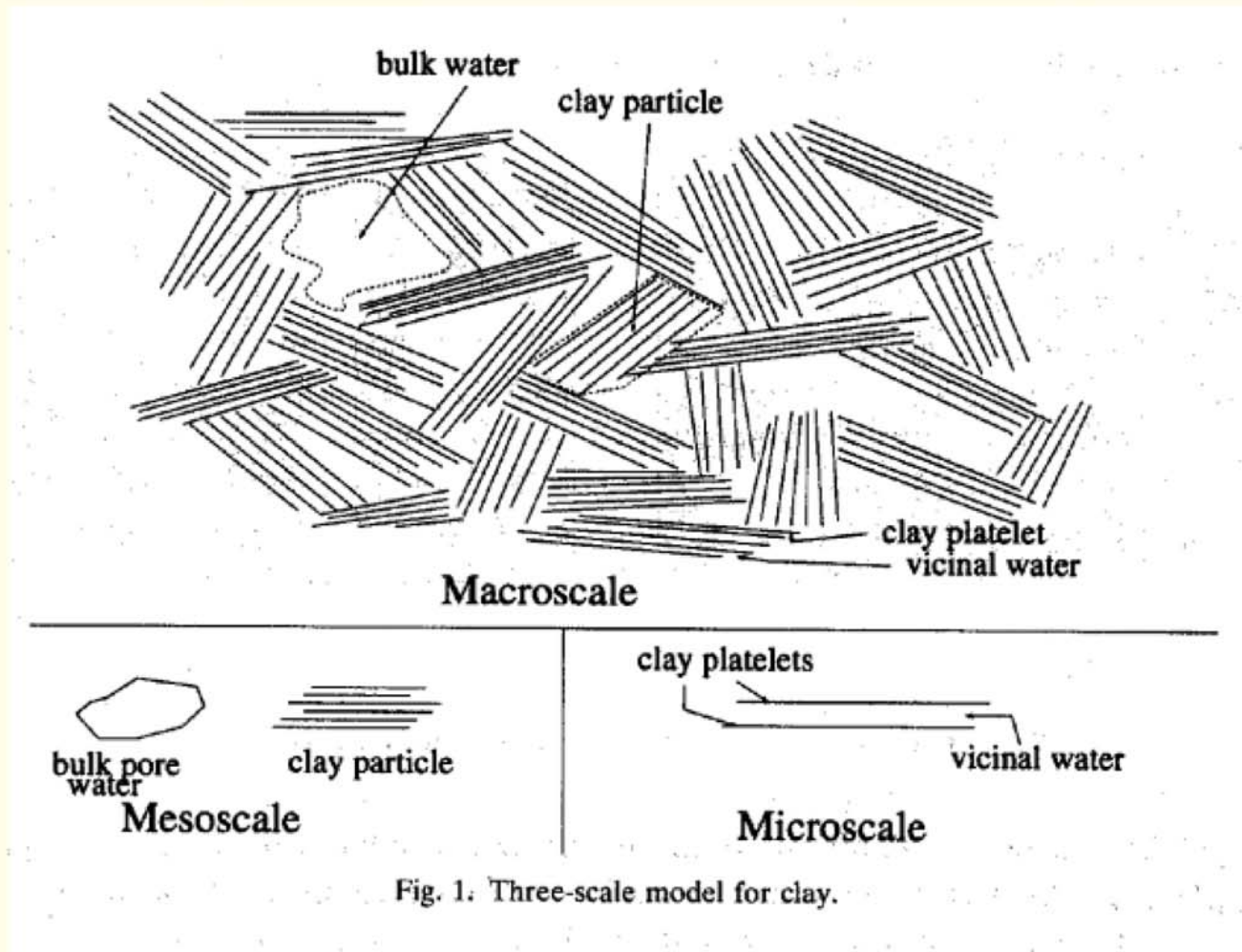


Structure de l'argile

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

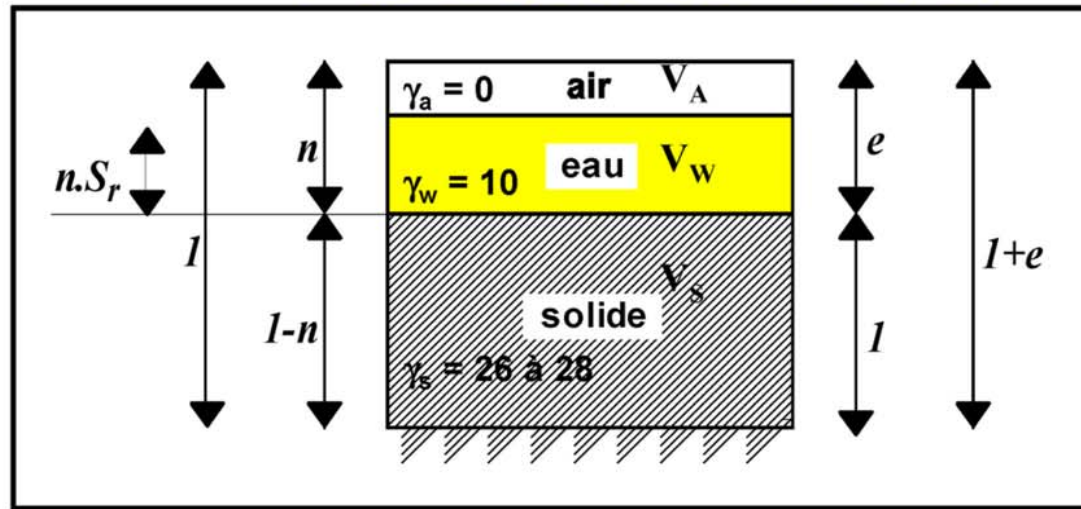
11

- Milieu à trois échelles



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

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

Diffusion à travers l'argile

- Solubilité (concentration max.)

Iode: 1 Plutonium: 10^{-4} Uranium: $3 \cdot 10^{-7}$

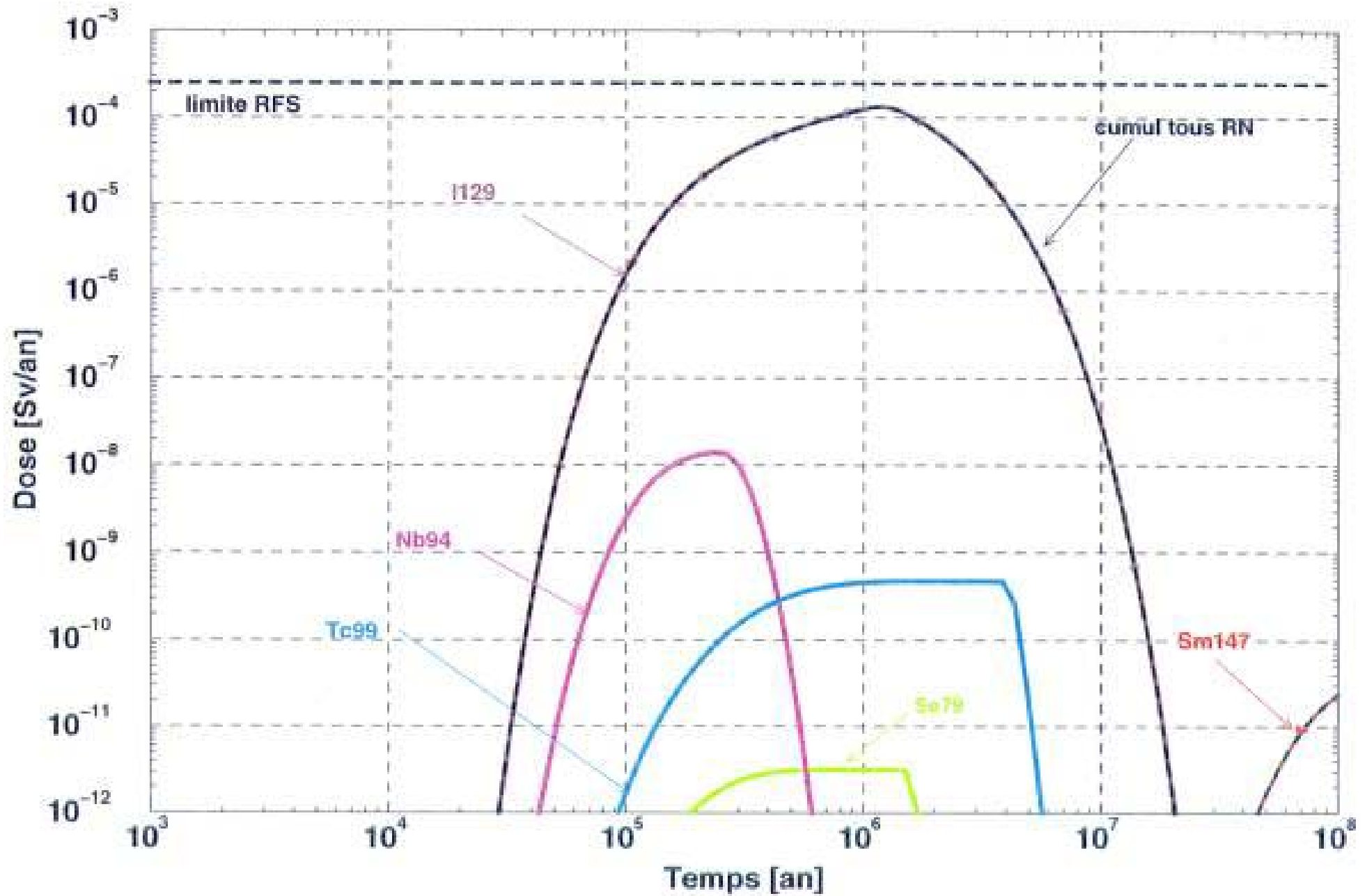
- Coefficients de retard

Iode:1 Plutonium:5000 Uranium: 500

- Déplacements après une période

Noyau	retard	T1/2	déplacement m
Iode	1	15000000	300
Plutonium	500	24000	0,5

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.

Transmutation

Transmutation des PF

- Durée de vie dans un flux de neutrons:

$$\tau = 1 / \phi \sigma_{\text{cap}} \quad \phi = \text{flux de neutrons}$$

$$\sigma_{\text{cap}} = \text{section efficace de capture}$$

- Exemple: ^{99}Tc

Avantage aux n Thermiques

Exemples de transmutation des LLFF

Production de LLFF par neutron

<i>Long Lived Fission Products</i>							
<i>Noyau</i>	<i>^{79}Se</i>	<i>^{90}Zr</i>	<i>^{99}Tc</i>	<i>^{107}Pd</i>	<i>^{126}Sn</i>	<i>^{129}I</i>	<i>^{135}Cs</i>
<i>produit</i>	<i>0.09</i>	<i>1.2</i>	<i>1.4</i>	<i>0.35</i>	<i>0.035</i>	<i>0.30</i>	<i>0.60</i>
<i>PF/100n</i>							

- Besoins de neutrons: 0.04 per n produced
- Séparation Isotopique : Zr, Cs

Incinération des Actinides

- Incinération par fission
- Production d'énergie associée à la fission:
Fission de **1 ton of Actinide** \propto **2 Mton pétrole**
- A cause des captures de neutrons plus d'un neutron est nécessaire par incinération. Mais plus de deux neutrons sont produits par fission. Nombre de neutrons consommés par incinération:

$$D = n_c - \nu F$$

Evolution du combustible

Equations de Bateman:

Variation de n_i = Production - Destruction

Production par capture de neutrons ou par désintégration d'un noyau père

Destruction par absorption de neutron ou désintégration

$$\frac{dn_i}{dt} = \sum_{j \neq i} \left(\sigma_{j \rightarrow i}^{(c)} \varphi + \lambda_{j \rightarrow i} \right) n_j - \left(\sigma_i^a \varphi + \sum_j \lambda_{i \rightarrow j} \right) n_i$$

$\lambda_{i \rightarrow j}$ Est la constante radioactive du noyau i vers j

$\sigma_{j \rightarrow i}^{(c)}$ Est la section de capture de j donnant i

Signification de D

- $D > 0$: poisons neutronique
- Les neutrons rapides sont plus efficace pour l'incinération. Conséquence de la fissionnabilité des actinides pou des neutrons de plus de 1 MeV.
- Les actinides mineurs sont de puissants poisons neutroniques pour des spectres de REP
- Les A.M. produisent des neutrons avec les spectres rapides

Valeurs de D (Salvatores)

spectre de Neutron

Noyau	Rapide 10^{15} n/cm^2	REP 10^{14} n/cm^2
239Pu	-1.46	-0.67
240Pu	-0.96	0.44
242Pu	-0.44	1.76
237Np	-0.59	1.12
241Am	-0.62	1.12
243Am	-0.60	0.82
Dtru (PWR)	-1.17	-0.05
Dpu (PWR)	-1.1	-0.2

Incinération du Pu en REP

Un seul recyclage MOx

- Mélange de UO_2 faiblement enrichi et de PuO_2
- 1/3 des éléments de type MOx, 2/3 de type UO_x (neutrons retardés)
- Régénération Partielle du Pu
- Production d'isotopes lourds de Pu et de AM
- Détérioration des propriétés neutroniques du Pu irradié.
- Pas de gain de radio-toxicité
- Intérêt économique

Recyclage multiple

- Hétérogène
 - Augmentation de ^{240}Pu et ^{242}Pu qui sont des poisons neutroniques
 - Accroissement de la concentration en PuO_2 à chaque recyclage
 - Limitation de la concentration en Pu à 14% (criticité rapide et pics de puissance)
 - Limitation à 3 recyclageq
 - Production de AM.

Recyclage multiple

Inventaire(Kg/GWe) au déchargement du combustible pour un parc de réacteurs avec 1, 2 ou un nombre infini de recyclages du Plutonium en MOx hétérogène

Isotope	Open cycle	1MOx	2MOx	MOx recycle
²³⁹ Pu	104,65	46,2	33,67	
²⁴⁰ Pu	47,74	36,68	23,1	
²⁴¹ Pu	25,55	17,78	11,27	
²⁴² Pu	18,83	18,76	12,32	
²⁴¹ Am	5,32	11,34	14,189	30,8
²⁴³ Am	4,41	8,75	11,62	19,6
²⁴⁴ Cm	1,89	3,85	4,9	7,35
²⁴⁵ Cm	0,14	0,56	0,77	1,26

- Cycles hétérogènes modifiés
 - Remplacer U_{ox} par une matrice passive (ex: CeO₂).
 - éléments combustibles annulaires minimisent les pics de puissance
 - Stabilisation and réduction de l' inventaire Pu possible
 - Production accrue des AM
- Cycles Homogènes
 - Tous les éléments similaires: 1% Pu, 2% ²³⁵U
 - Stabilisation and réduction de l' inventaire Pu possible
 - Production accrue des AM

- Les déchets nucléaires: LLFP, Pu, et AM.
- LLFP nécessitent environ 10% des neutrons pour être transmutés.
- L'incinération du Pu produit environ 1/4 de l'énergie produite par les REP.
- L'incinération des AM produit 10 fois moins d'énergie. Systèmes dédiés?

- L'incinération des AM réduit significativement la radio-toxicité.
- Le cycle Thorium simplifierait beaucoup la gestion des déchets HAVLdu fait d'une production très réduite de AM
- R et D:
 - Réacteurs Hybrides
 - Caloporteurs (Pb)
 - Sels fondus
 - Cycle Thorium

Retraitement actuel

- Pourquoi?

- Plutonium pour RNR
- Utilisation de l'investissement (La Hague)

- Comment?

- Extraction de Uranium et Plutonium

- Résultat

- MOx: Plutonium+U appauvri
- Gain de 10 % sur les besoins en uranium enrichi

- HAVL/an (COGEMA, La Hague):

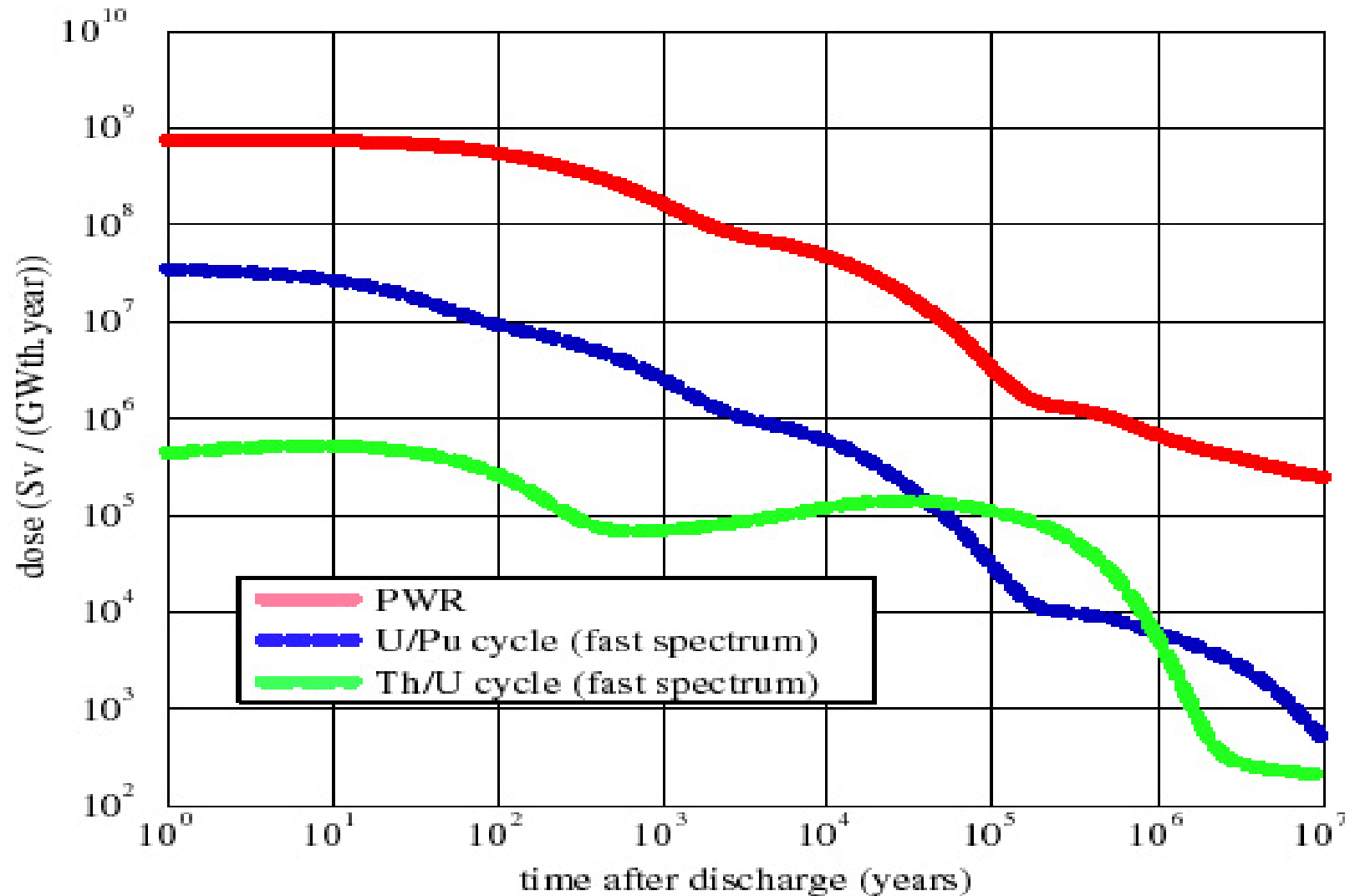
- Verres (PF+AM +pertes) 500 tonnes
- MOx Irradié : 160 tonnes

Incinération

Gains sur la « radiotoxicité » après 1000 ans

- Incinération Pu (Surgénération U-Pu): 50
- Cycle Thorium : 1000

Minimiser la production



Evolution schématique

Combustible surgénérateur schématique:

- 1 fertile
- 1 fissile
- P.F.

$$\frac{dn_{cap}}{dt} = -n_{cap} \sigma_{cap}^{(a)} \varphi + S(t) = 0$$

$$\frac{dn_{fis}}{dt} = n_{cap} \sigma_{cap}^{(a)} \varphi - n_{fis} \sigma_{fis}^{(a)} \varphi$$

$$\frac{dn_{FF}}{dt} = n_{fis} \sigma_{fis}^{(f)} \varphi$$

Equilibre

Evolution d'un seul noyau initial k :

Injection d'un flux unité constant de ce noyau:

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = \delta_{ik} + \sum_{j \neq i} (\sigma_{j \rightarrow i}^{(c)} \varphi + \lambda_{j \rightarrow i}) n_j(t) - \left(\sigma_i^a \varphi + \sum_j \lambda_{i \rightarrow j} \right) n_i(t)$$

A l'équilibre:
$$\frac{dn_i(t)}{dt} = 0$$

Solutions: N_i

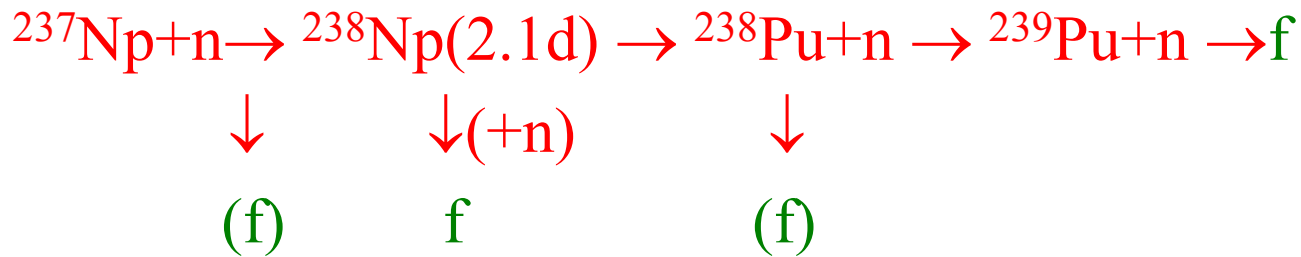
$$0 = \delta_{ik} + \sum_{j \neq i} (\sigma_{j \rightarrow i}^{(c)} \varphi + \lambda_{j \rightarrow i}) N_j - \left(\sigma_i^a \varphi + \sum_j \lambda_{i \rightarrow j} \right) N_i$$

Incinération des Actinides

Disparition par fission :

→ production d'énergie

Exemple : ^{237}Np



Nombre de neutrons consommés :

$$D = 1 + (1 - \nu) \frac{\sigma_f^{(238\text{Np})} \varphi}{\sigma_f^{(238\text{Np})} \varphi + \lambda^{(238\text{Np})}} + \\
 (2 - \nu) \frac{\lambda^{(238\text{Np})} \varphi}{\sigma_f^{(238\text{Np})} \varphi + \lambda^{(238\text{Np})}}$$

Balance neutronique

Taux d'absorption neutronique :

$$D_k^{(a)} = \sum_i N_i \sigma_i^{(a)}$$

Taux de production neutronique :

$$D_k^{(p)} = \sum_i \nu_i N_i \sigma_i^{(f)} + \sum_i 2 N_i \sigma_i^{(n,2n)}$$

Taux net consommation de neutron pour un noyau k :

$$D_k = D_k^{(a)} - D_k^{(p)}$$