

Que faire de nos déchets nucléaires ?

Sylvain DAVID

CNRS

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

sdavid@ipno.in2p3.fr

La gestion du combustible utilisé aujourd'hui (France, US, ...)

Le statut du plutonium particulier du plutonium

Déchet ou combustible ?

Principe des réacteurs surgénérateurs (gén 4)

Stockage vs Entreposage

La voie de la transmutation

Principe

Avantages et inconvénients

Les recherches dans le domaine

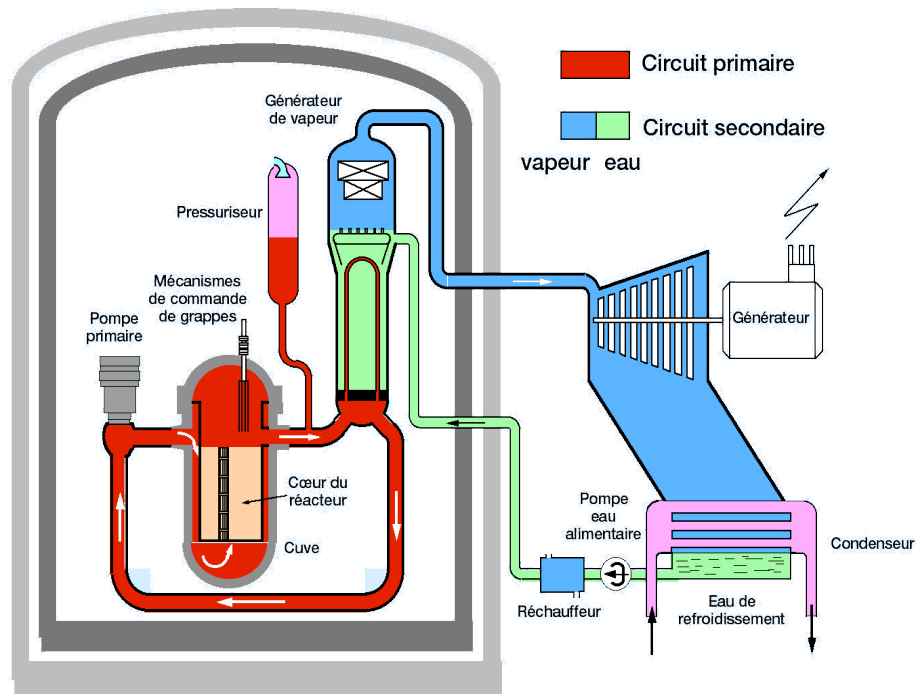
Ce dont nous ne parlerons pas : le cycle thorium

Filières actuelles : réacteurs refroidis à l'eau légère

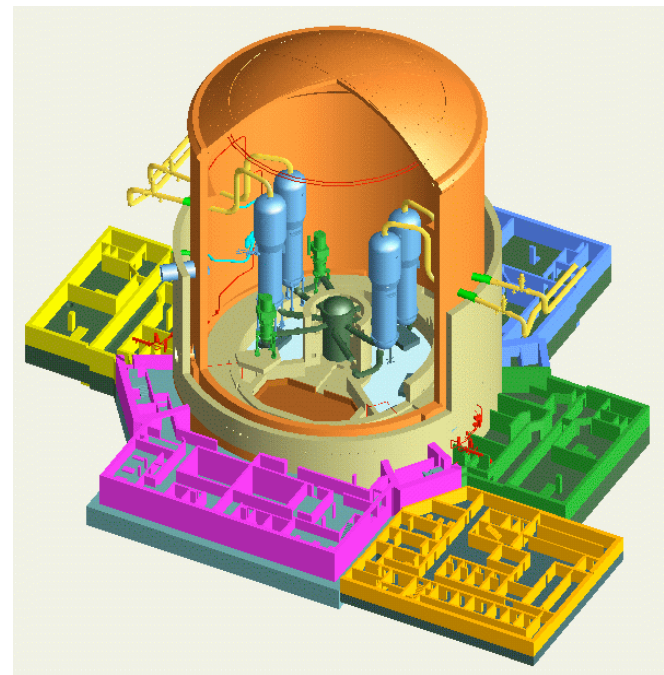
L'eau sert de caloporteur et de modérateurs de neutrons

→ réacteurs à neutrons lents

2^{ème} génération
REP actuels
Réacteurs à eau pressurisé

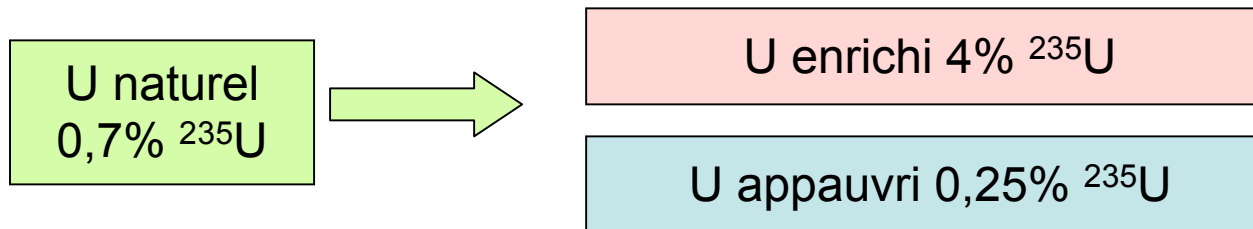


3^{ème} génération
EPR
European Pressurized Reactor
Evolutive Power reactor



2^{ème} et 3^{ème} générations

Les filières actuelles sont basées sur l'utilisation de l'²³⁵U, seul fissile naturel

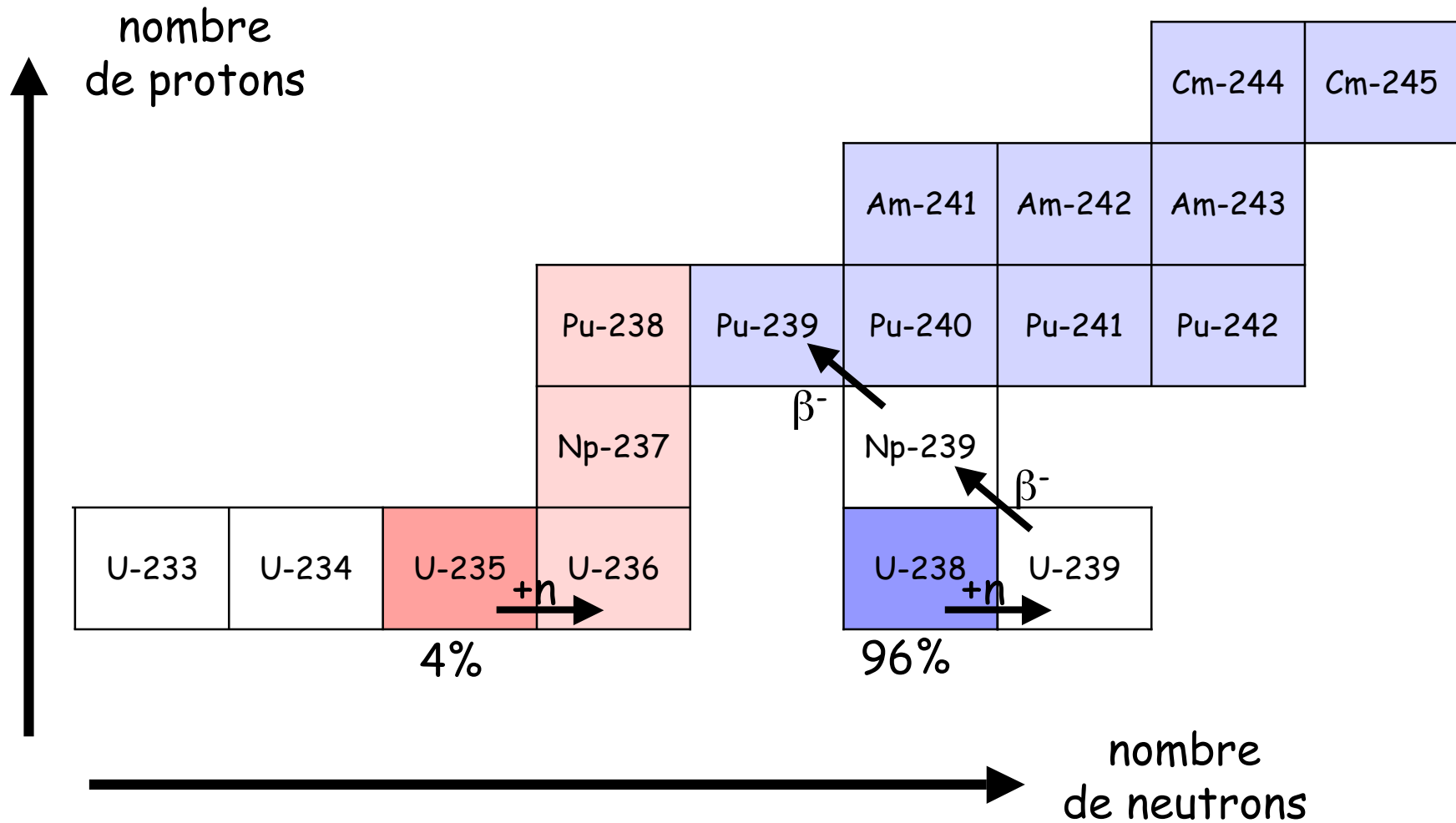


U	/(GWe.an)
fissionné	1 t
enrichi	30 t
naturel	200 t

Taux d'utilisation du minerai d'uranium = 0,5 %

Optimisation possible jusqu'à 1%

Poursuite du nucléaire « gen2-3 » : Aval du cycle



A l'issue de l'utilisation d'un combustible UOX (U enrichi 4%)
ayant produit une énergie de 1 GWe.an

REP 900 MWe, 3 ans d'irradiation, gestion par 1/3 de cœur

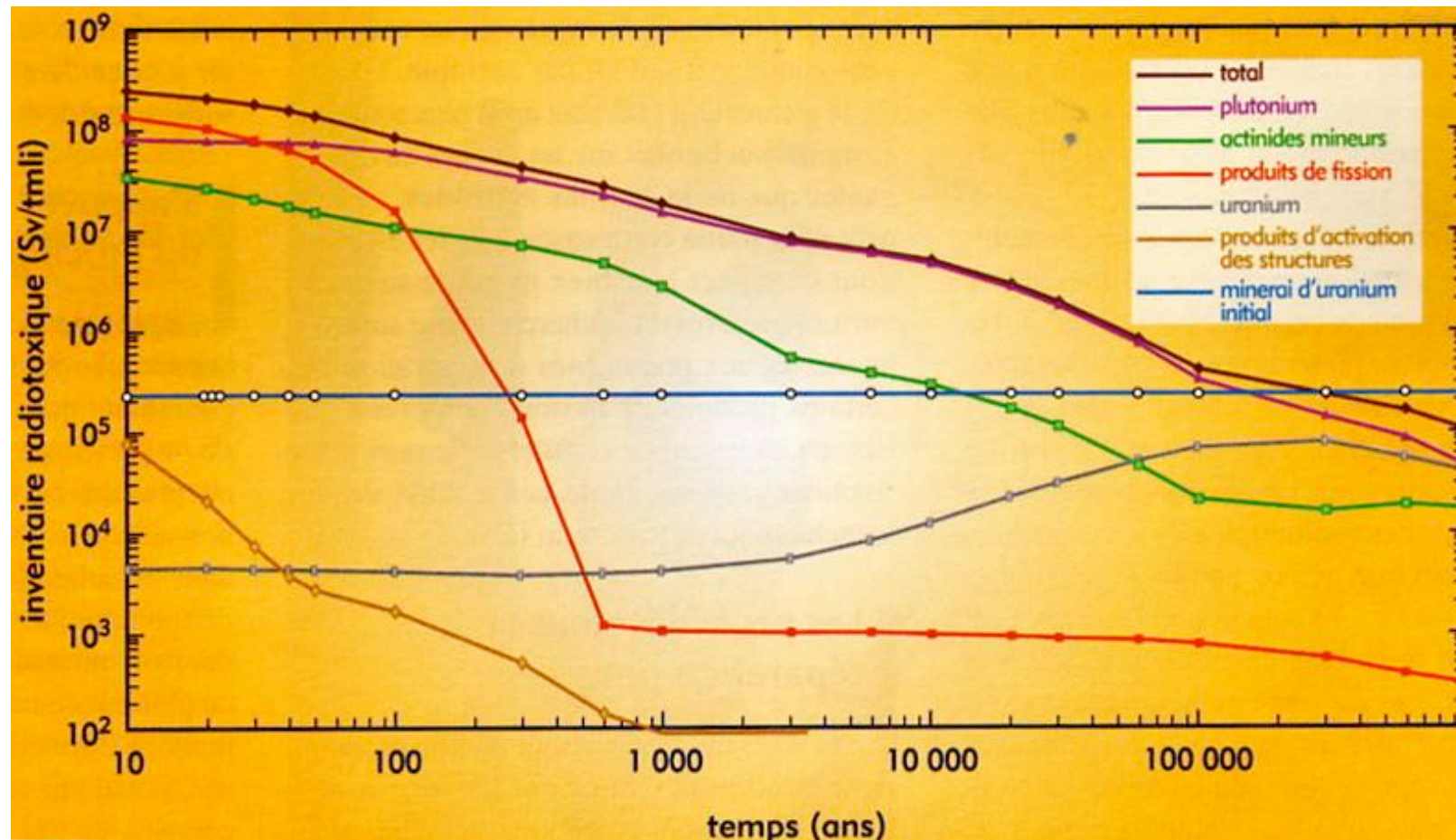
Inventaire d'un tiers de cœur pendant 3 ans, E = 1 GWe.an = 8,7 TWh

	t=0	t=3 ans
^{238}U	26328	25655
^{235}U	954	280
^{236}U	-	111
^{239}Pu	-	156
Pu tot	-	266
Am, Cm	-	20
PF vie moyenne ^{137}Cs , ^{90}Sr (≈ 30 ans)	-	43
PF vie longue ($\approx 10^{5-6}$ ans)	-	63
PF total	-	946

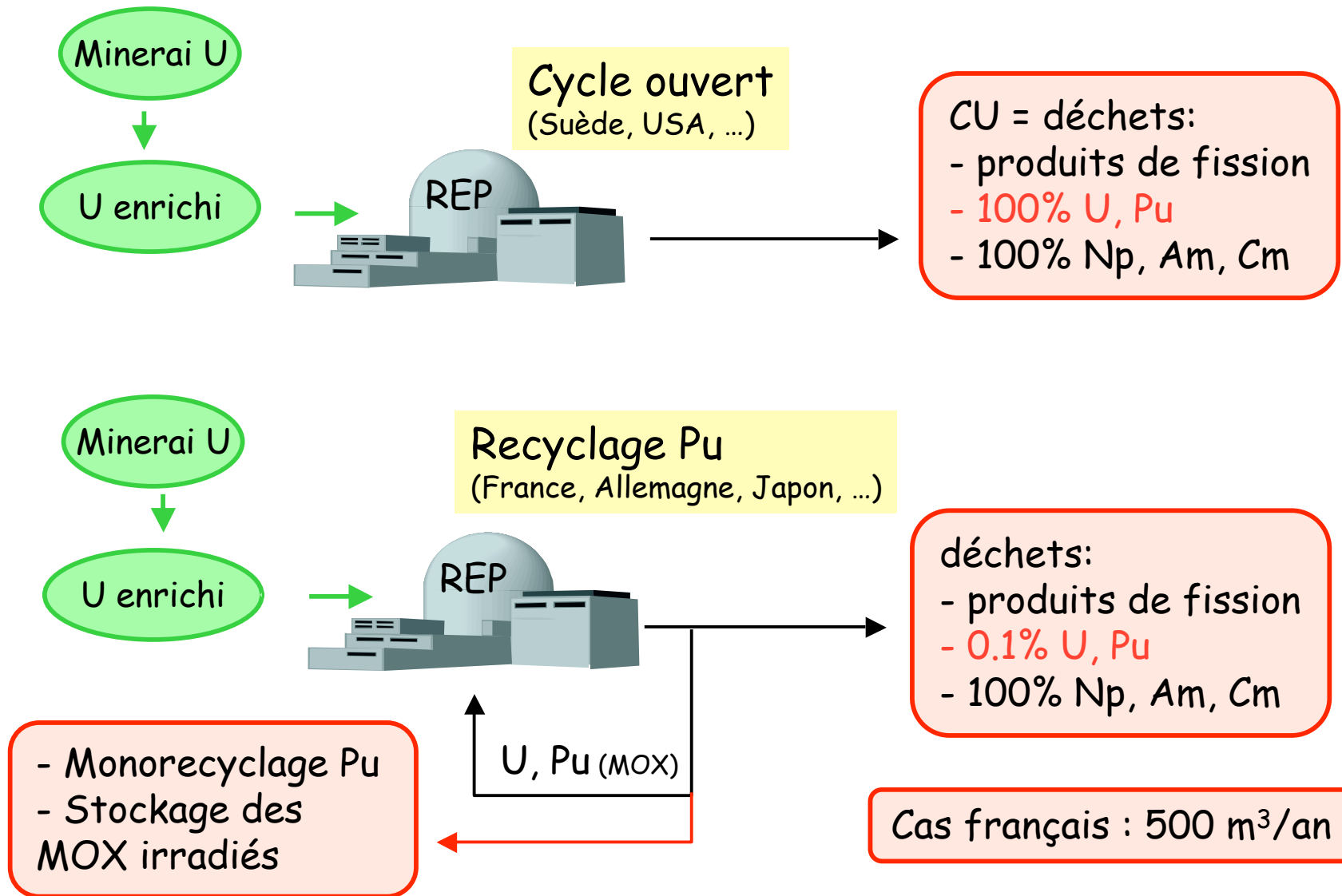
Radiotoxicité du combustible utilisé (\approx chaleur résiduelle)

- 0-20 ans : PF (30 ans) dominant
- 20-10⁶ans : Pu domine

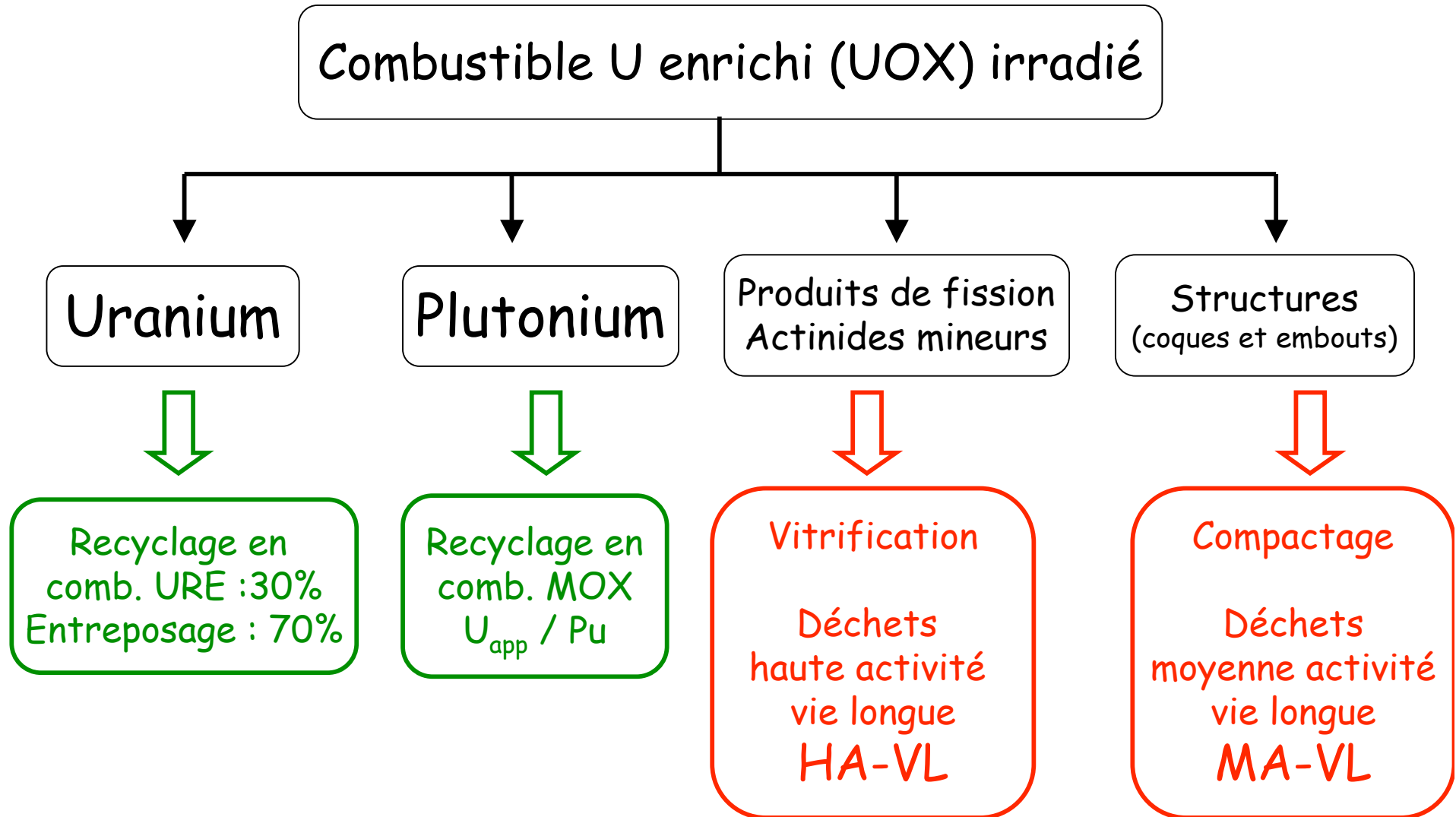
Courbe de référence : 200 tonnes d'Unat et non 1 tonne d'U fissionnée (?)



Gestion du combustible irradié : 2 stratégies très différentes



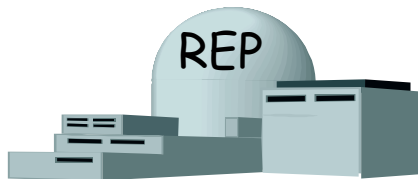
La stratégie française : la voie du retraitement



Le combustible MOX

- 20 réacteurs (900 MWe) fonctionnent au combustible UOX (70%) + MOX(30%)
- 8% de la puissance du parc
- Les MOX usés ne sont pas retraités

Assemblage MOX
U 93% + Pu 7%



3 ans
en réacteur

Assemblages MOX
irradiés
Entreposage

- Uranium ($\approx 92\%$)
- Produits de fission ($\approx 4\%$)
- Plutonium ($\approx 4\%$)
- Actinides mineurs
(américium, neptunium, curium)

Quelques définitions extraites de la loi de 2006

Matière radioactive : substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement

Déchets radioactifs : substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée

Déchets radioactifs ultimes : déchets radioactifs qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant et dangereux

Le statut particulier du plutonium

Le plutonium est-il une matière valorisable?

^{239}Pu et ^{241}Pu = noyaux fissiles, donc potentiellement valorisable, mais

^{241}Pu 15 ans de durée de vie, β^- , produit du ^{237}Np , non fissile
→ valorisable mais pas en 2050 !

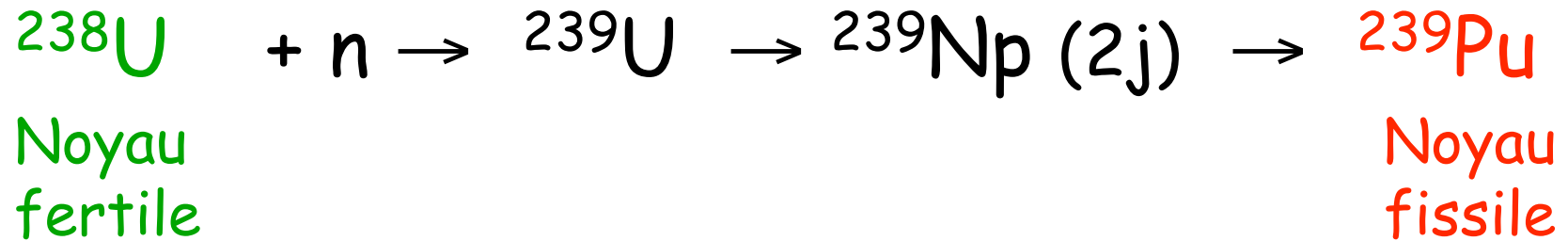
Le ^{239}Pu peut être recyclé en tant que matière fissile dans les réacteurs actuels

Mono recyclage (cas français) : 10% d'économie en U naturel

Multi-recyclage (plus complexe) : 20% d'économie en U naturel
production d'actinides mineurs ++

L'utilisation dans les réacteurs surgénérateurs : valorisation réelle du Pu

Principe de la régénération

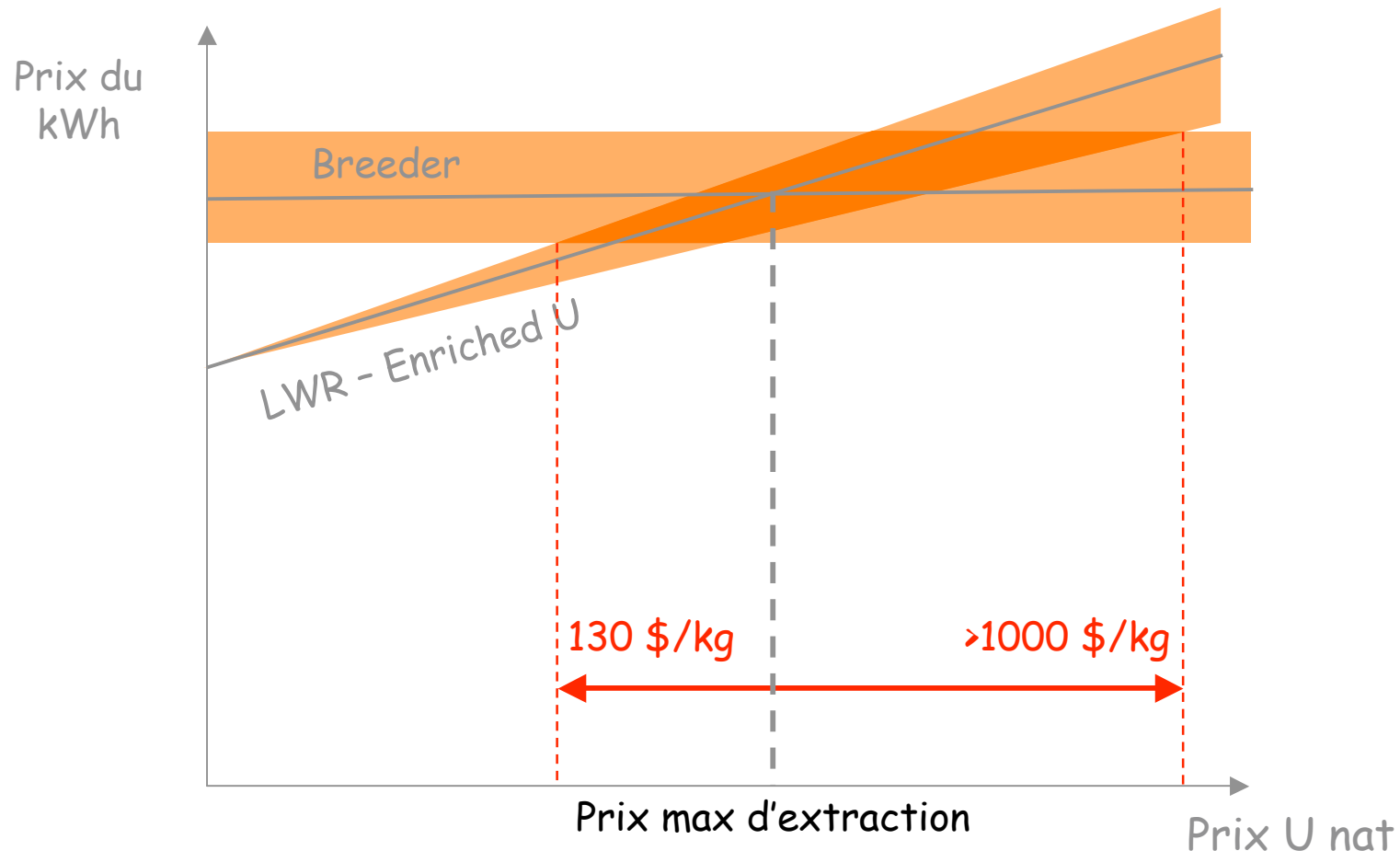


Régénération

- Le Pu fissionné est régénéré : Masse Pu = cte
- Seul l' ${}^{238}\text{U}$ est consommé au taux de 1 tonne / (GWe.an)
- Taux d'utilisation du minerai d'uranium = 100 %
- Incontournable si le nucléaire se développe massivement

Mais il faut des réacteurs à neutrons rapides pour atteindre la régénération
Une fois le réacteur rapide démarré, il ne consomme plus que de l' ${}^{238}\text{U}$
Il faut lui fournir au moins 12 tonnes de Pu au démarrage
Parc français 60 GWe \rightarrow 800 tonnes Pu à l'équilibre
Inventaire Pu actuel = 220 tonnes...

De grande incertitudes concernant la date d'arrivée des régénérateurs



Incertaines sur le prix de l'uranium à partir duquel ils sont compétitifs

A prix d'extraction limite donné, incertitudes des réserves.

Exemple à 400 \$/kg : de 10 à 23 millions de tonnes (160 à 400 ans au rythme actuel)

En résumé

Si le nucléaire se développe peu

Réserves Uranium pendant plusieurs siècles

Pas de besoin de régénération

Pas « besoin » (économique) de démarrer des surgénérateurs

Pas « besoin » du Pu

Pu = déchet, incinération possible

(vision américaine dominante actuelle)

Si le nucléaire se déploie significativement (facteur 10 d'ici 2050-2100)

Filières actuelles non soutenables (réserves Uranium)

Besoin de beaucoup de Pu pour démarrer les régénérateurs

Pu = matière précieuse à garder sur plusieurs décennies

(vision française)

En France, le classement déchets / matières valorisables part du principe que les régénérateurs seront utiles vers 2040

Toute les matières qui contiennent du Pu sont valorisables, *même si elles contiennent également beaucoup de déchets*

HA-VL (verres)	1600 m ³
MA-VL - parc REP - autres	29000 m ³ 16000 m ³
Uranium appauvri retraitement	220 000 t 16 000 t
UOX usés	10500 t
MOX usés	520 t

Déchets ultimes

Matière valorisable

**Produits de fission
850 t**

**Actinides mineurs
28 t**

**Plutonium
130 tonnes
(+90 t usines)**

D'après ANDRA, 2002

Pas d'ambigüité sur le statut des déchets HAVL et MAVL

Leur conditionnement est considéré comme « définitif », la solution qui « s'impose » est donc le stockage définitif !

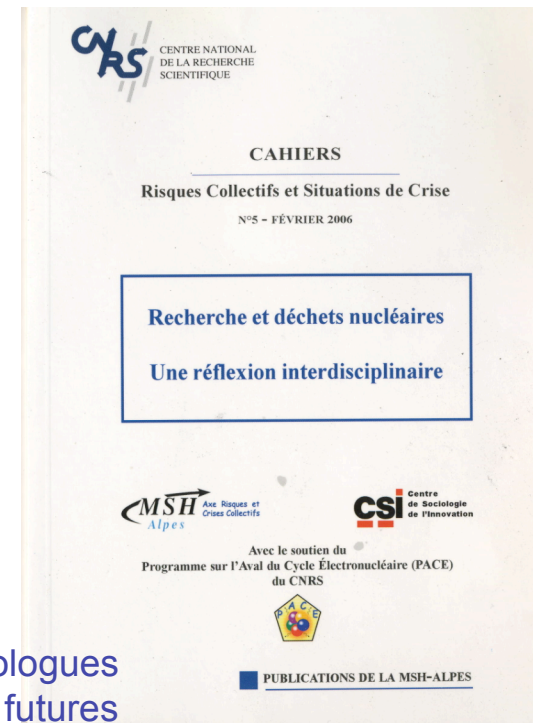
→ l'irréversibilité est contenue dans la vitrification, qui elle n'est jamais discutée (loi 1991, 2006, débat public 2005)

Extraits loi de 2006

Entreposage : opération consistant à placer ces substances dans une installation spécialement aménagée pour les conserver de façon potentiellement définitive (...)

Stockage en couche géologique profonde : stockage de ces substances dans une installation spécialement aménagée à cet effet, dans le principe du respect de réversibilité

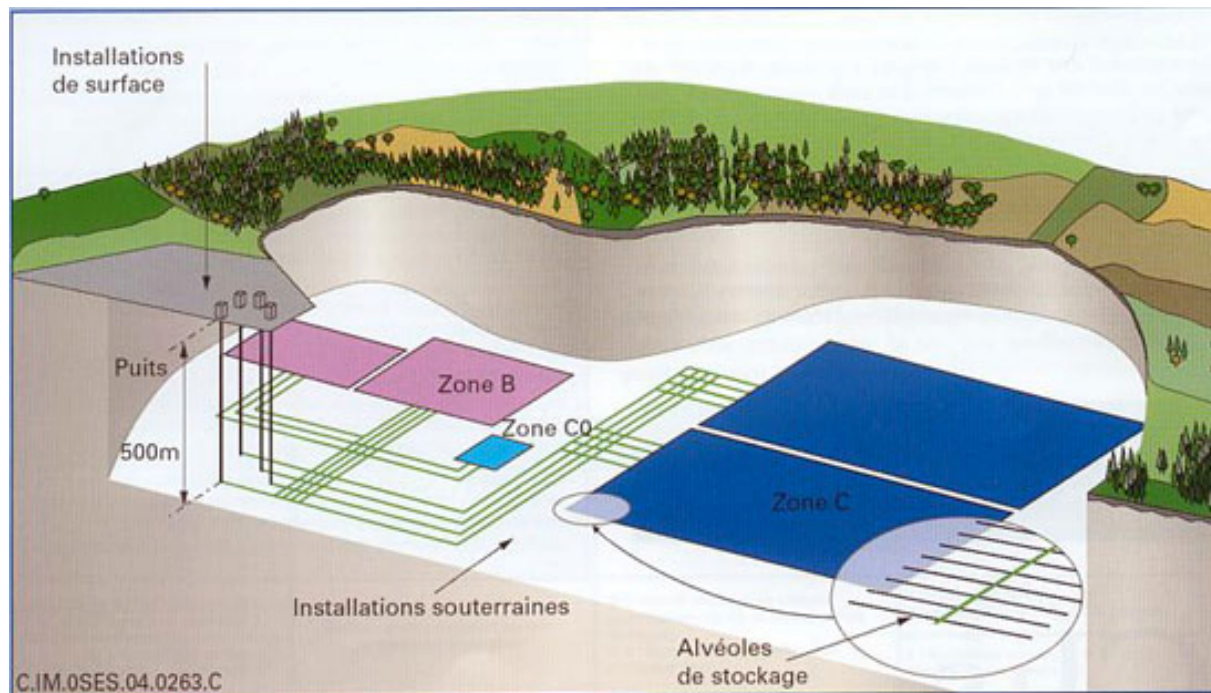
Collaboration physiciens/sociologues
Question de la réversibilité, legs aux générations futures



Gestion des déchets ultimes : l'option stockage

- Vitrification considérée comme irréversible
- Stockage couche argile 500 mètres sous terre
- Un stockage est par conception irréversible
- Surface 300 ha pour les verres HAVL (évacuation de la chaleur résiduelle)
- Option de référence en France (loi de 2006)

Site de Bure



Stockage en France

- Réversibilité : possibilité d'arrêter si la sûreté n'est pas prouvée
- Décision 2015
- Première « descente » des HAVL : 2050-2070 ?
- Fermeture définitive du stockage : 2300 ?
- Depuis 2006 : les MAVL sont concernées par le stockage profond, eux peuvent descendre en 2050 (une façon de régler en partie le problème de la déliaison temporelle de la décision?)



Bure, 2007

Dans le monde

Suède : moratoire nucléaire, stockage déchets approuvé

Allemagne : stockage envisagé dans les mines de sels : réversibilité impossible

USA : Yucca Mountain (70000t) serait saturé par le parc actuel, recyclage Pu envisagé

Gestion des déchets ultimes : l'option entreposage

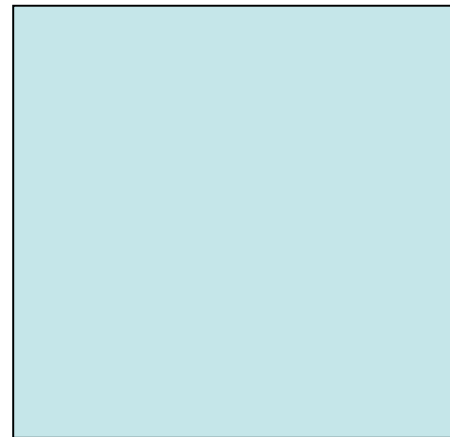
Entreposage comme gestion pérenne (cf débat public)

Principe de réversibilité:

- garder et surveiller les déchets en surface ou subsurface
- obligation de garder des compétences et de mettre en œuvre des programmes de recherche pour améliorer la gestion
- implication des « générations » à venir
- option souple, car toutes les options restent ouvertes, par exemple la transmutation dans le futur
- mais l'image de l'entreposage est très négative, car les décideurs donnent l'impression de ne pas décider...



Entreposage
1 ha en surface ou subsurface



stockage
300 ha 500 m sous terre

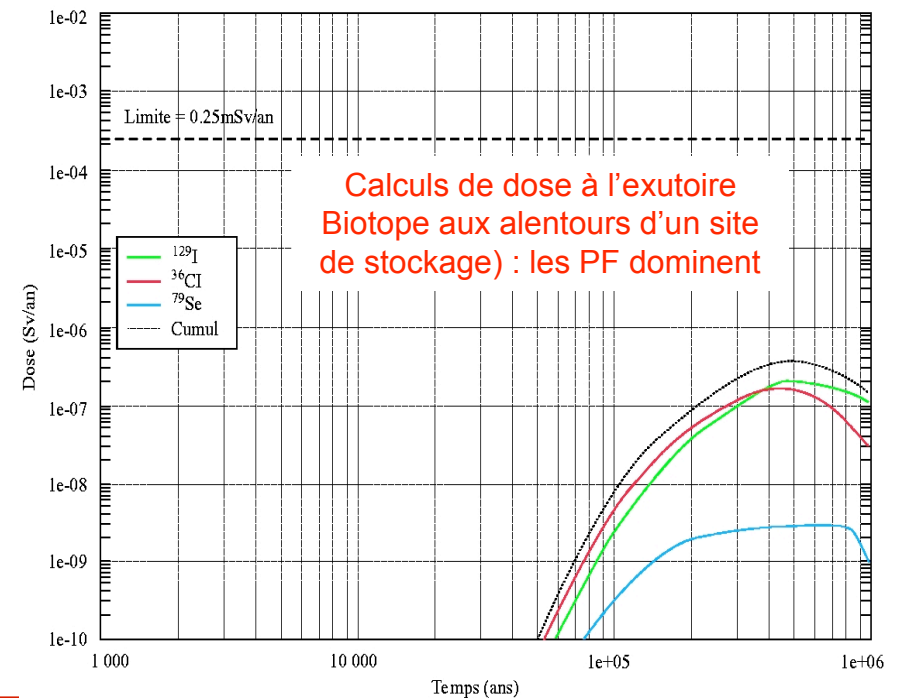
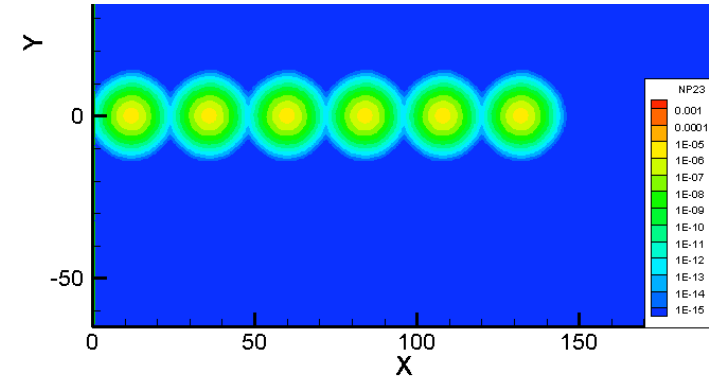
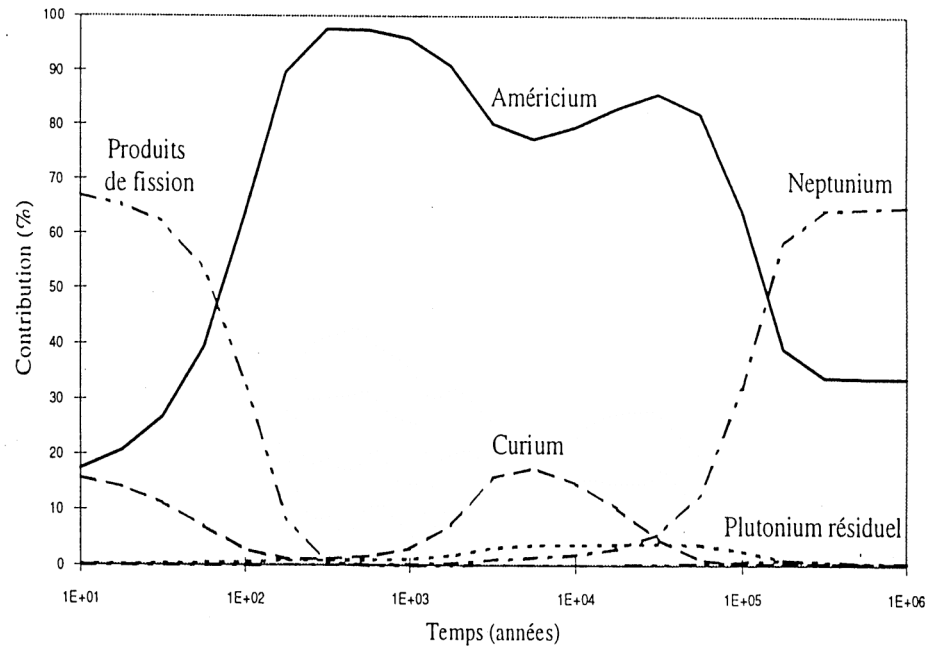
Des positions difficiles à comprendre

	Confiance dans la société	
	OUI	NON
<u>Les « pro-nucléaires »</u>		
- plutôt pour le stockage		✓
- pour un développement du nucléaire durable	✓	
<u>Les « anti-nucléaires »</u>		
- pour l'entreposage	✓	
- contre le nucléaire pour des raisons d'instabilité des sociétés		✓

L'option transmutation: que transmuter?

Exemple: diffusion des actinides au bout de 500000 ans \approx 15 m

Contribution à la radiotoxicité des verres actuels



Transmuter : recycler des noyaux en réacteur pour les faire disparaître par réaction nucléaire

Produits de fission à vie longue (risque résiduel)

- Ex : $^{99}\text{Tc} + n \rightarrow ^{100}\text{Tc} (\beta^- 15 \text{ s}) \rightarrow ^{100}\text{Ru}$ stable puis 4 stables \rightarrow OK
- $^{135}\text{Cs} + n \rightarrow ^{136}\text{Cs} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$ stable
- Mais présence de ^{133}Cs , qui produit ^{135}Cs par 2 captures...
- Autre difficulté : trouver des matrices très chargées en PF qui supportent l'irradiation. Pour l'iode, ce problème a été jugé rédhibitoire...
- La transmutation des PFVL n'est quasiment plus évoquée ni étudiée aujourd'hui

Transmutation des actinides mineurs (risque potentiel)

- Les actinides mineurs principaux sont non fissiles : ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm , ...
- Transmutation = fission, production de PF
- La fission est favorisée par les neutrons rapides
- Option étudiée aujourd'hui, mais pour les déchets futurs
- Diverses variantes, mais toujours avec des neutrons rapides

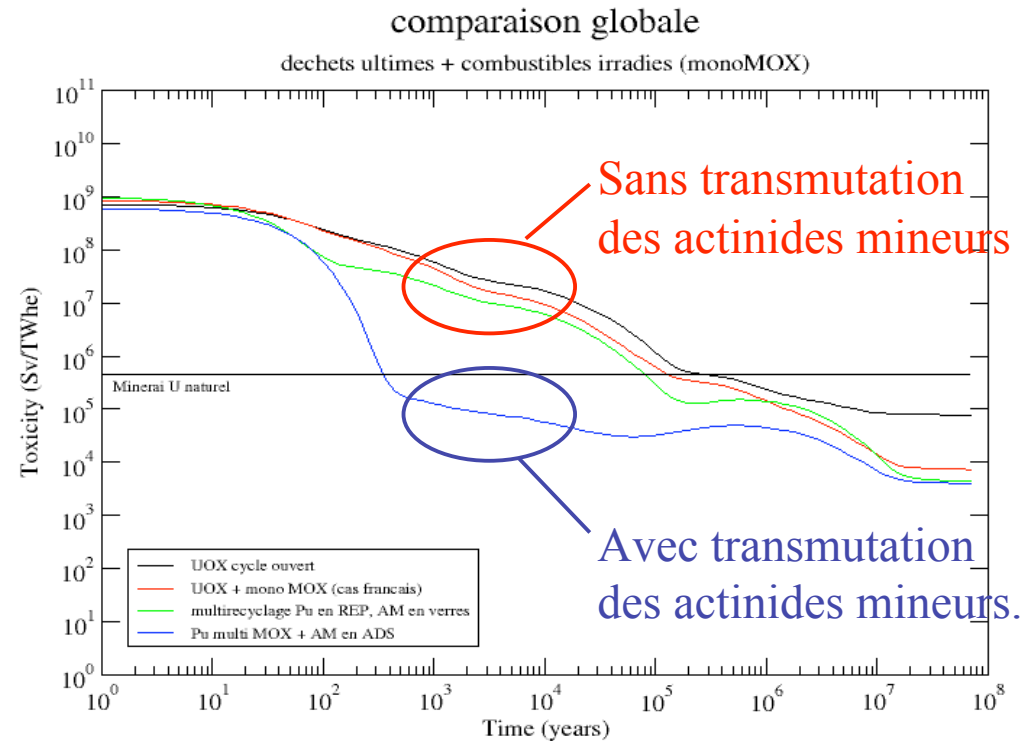
Gestion des déchets : l'option transmutation

La transmutation permet de produire des verres « allégés »

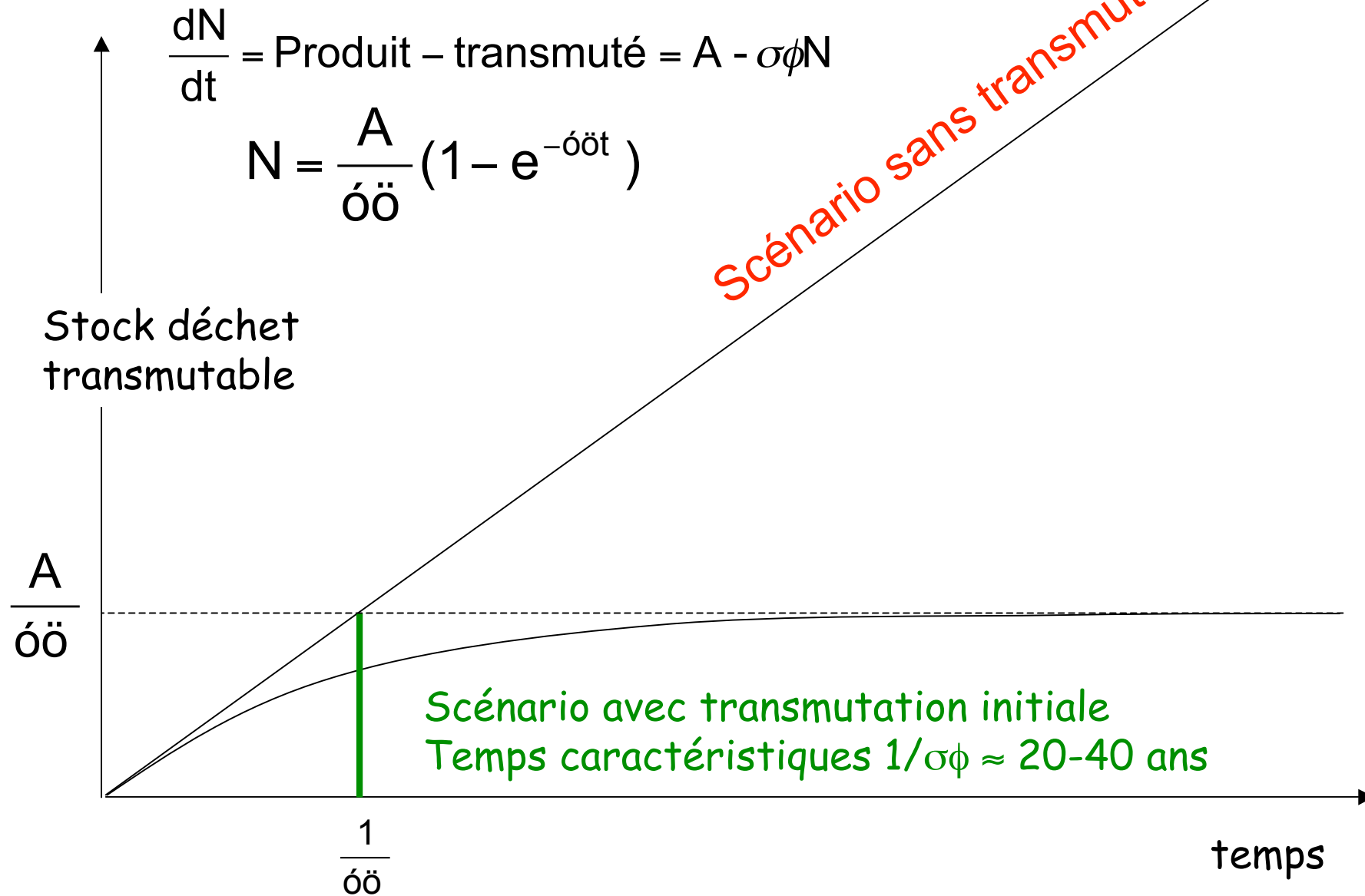
Risque potentiel à long terme réduit

Déchets moins « chauds », donc réduction du nombre de site de stockage

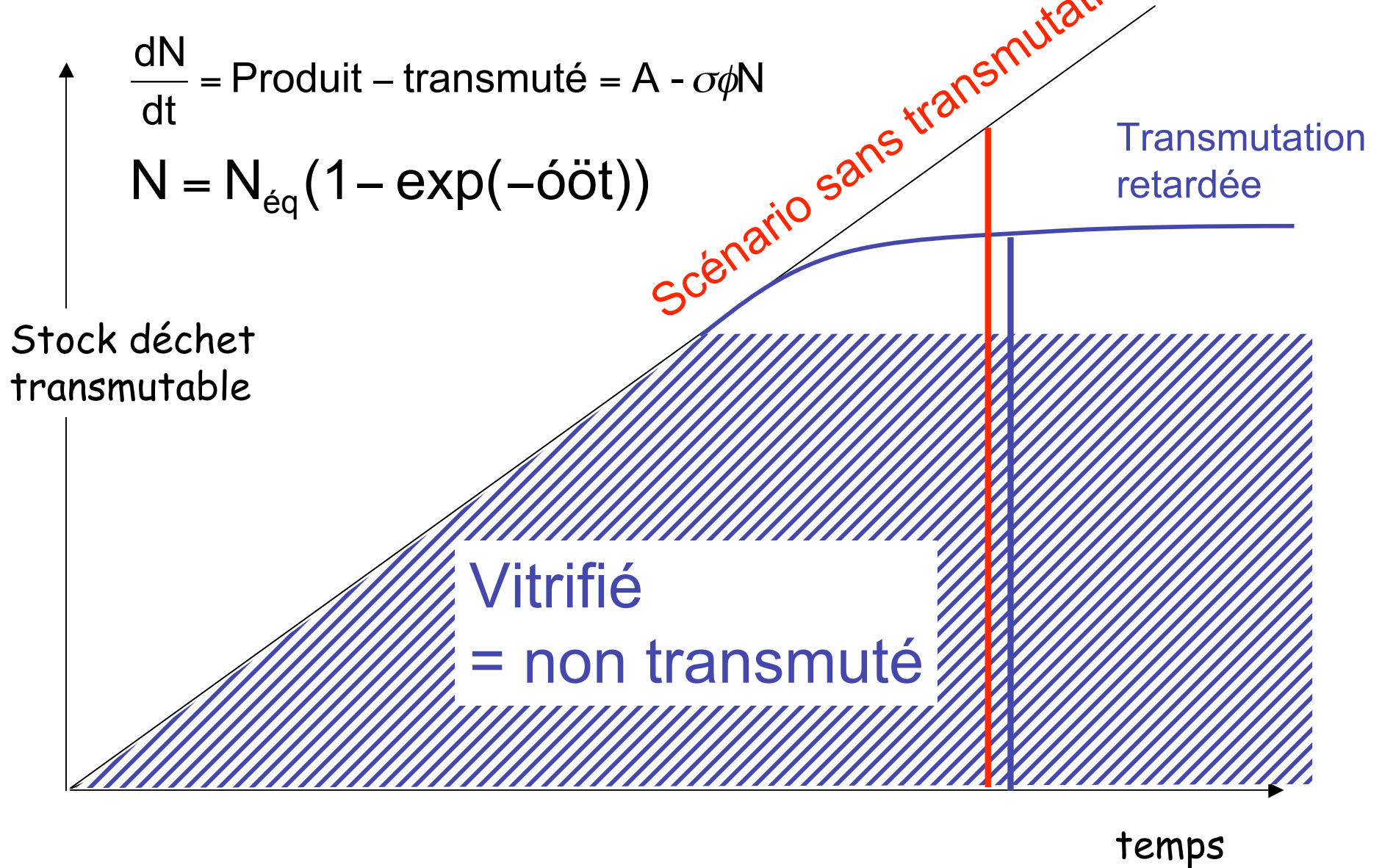
Couplage **transmutation / entreposage** longue durée (150-300 ans) : gain très important sur la taille du stockage



Principe de la transmutation



Principe de la transmutation



Comment mesure-t-on l'intérêt de la transmutation ?

- Caractéristique des déchets : radiotoxicité, puissance thermique résiduelle, volumes, emprise au stockage → relativement simple sur le principe
- Inventaire des déchets à l'équilibre dans les réacteurs et les usines du cycle → plus complexe, car tant que le nucléaire fonctionne, ces inventaires ne sont pas des déchets. Question de la fin de jeu. Comparaison très dépendante des hypothèses sur l'arrêt du nucléaire, 2100? 2200 ? 3000? ...
- Prise en compte du talon : déchets vitrifiés existants et engagés. Dépend de la date de mise en œuvre de la transmutation

Cela nécessite des études de scénarios, et un soin particulier à

- La définition des hypothèses des scénarios
- Les critères de comparaison (masses, volumes, radiotoxicité, dose à l'exutoire, ...)
- Etudes complexes et souvent très biaisées (hypothèses cachées !)

Attention, ces considérations sont très « européennes », aux US, la transmutation des AM est soutenue pour d'autres raisons que la minimisation des déchets : ne jamais séparer le Pu des actinides mineurs est une façon jugée très efficace de lutter contre la prolifération

La transmutation des actinides mineurs suppose que l'on sait ce que l'on fait du plutonium, ce n'est pas le cas aujourd'hui

On doit donc faire des hypothèses sur le scénario à étudier

Deux familles de scénarios

- Recours aux régénérateurs rapides (RNR)

Le Pu est multi recyclé dans les RNR (combustible)

Les AM peuvent être recyclés également

- Pas de recours aux régénérateurs

Pu = déchet, incinération possible en REP ou RNR dédié à l'incinération Pu

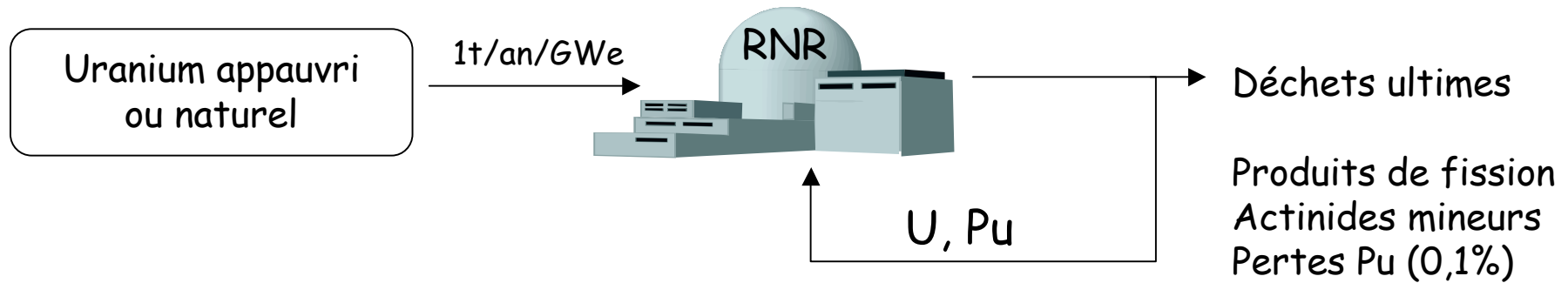
Les actinides mineurs doivent être transmutés avec des neutrons rapides

Scénarios plus innovants à base du cycle thorium

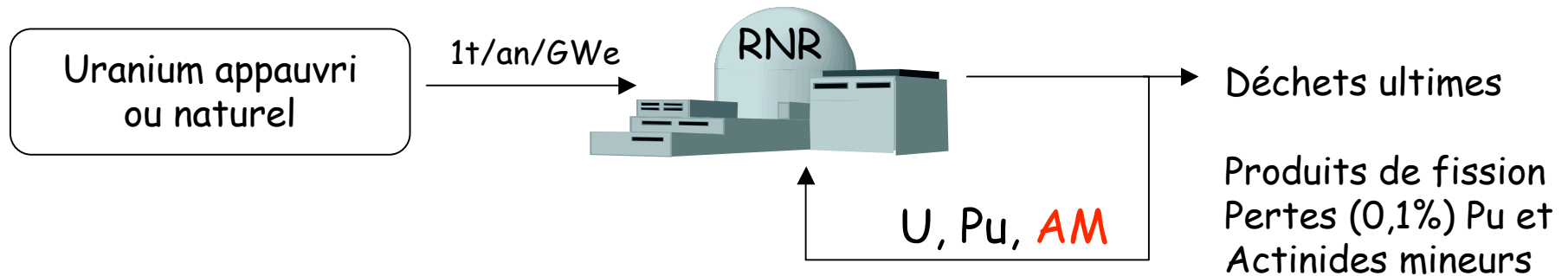
On traite ici le cas d'un scénario français avec les hypothèses suivantes:

- Puissance nucléaire installée constante = 60 GWe
- Démarrage des RNR régénérateurs en 2035 (variante 2080)
- Mise en place ou non de la transmutation dès le démarrage des RNR
- Point de comparaison des déchets en 2130
- Arrêt éventuel du nucléaire dès aujourd'hui ou entre 2100 et 2135
- (scénarios Débat Public Déchets Nucléaires 2005)

Sans transmutation



Avec transmutation



Famille C : Continuation du nucléaire

C1

Remplacement du parc actuel

50% EPR 2020 - 2035

50% RNR 2035 - 2050

C2

Remplacement du parc actuel

50% EPR 2020 - 2035

50% RNR 2035 - 2050

+ Transmutation des Act. Min.
en RNR dès 2040

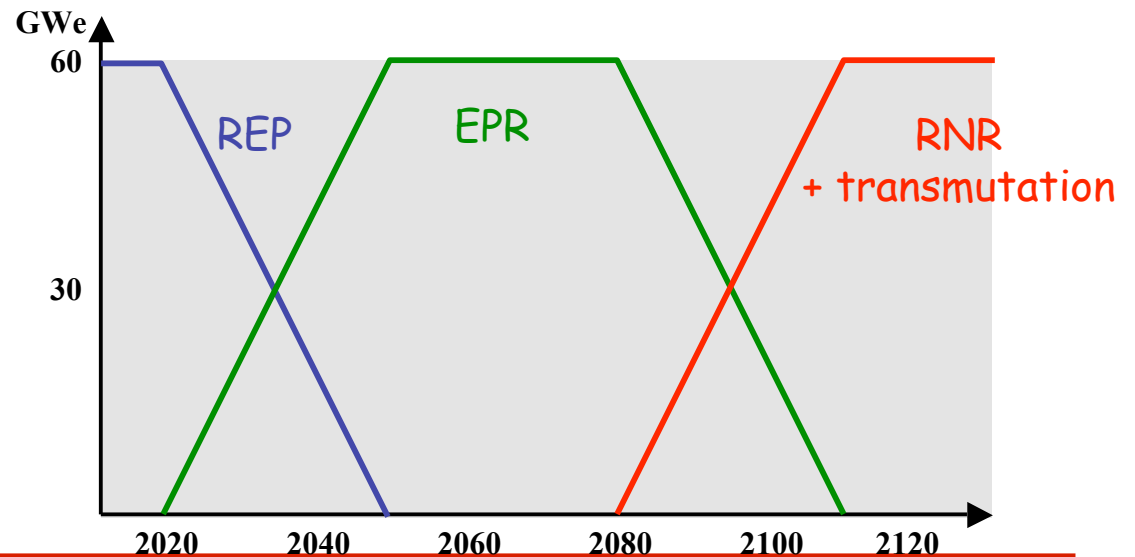
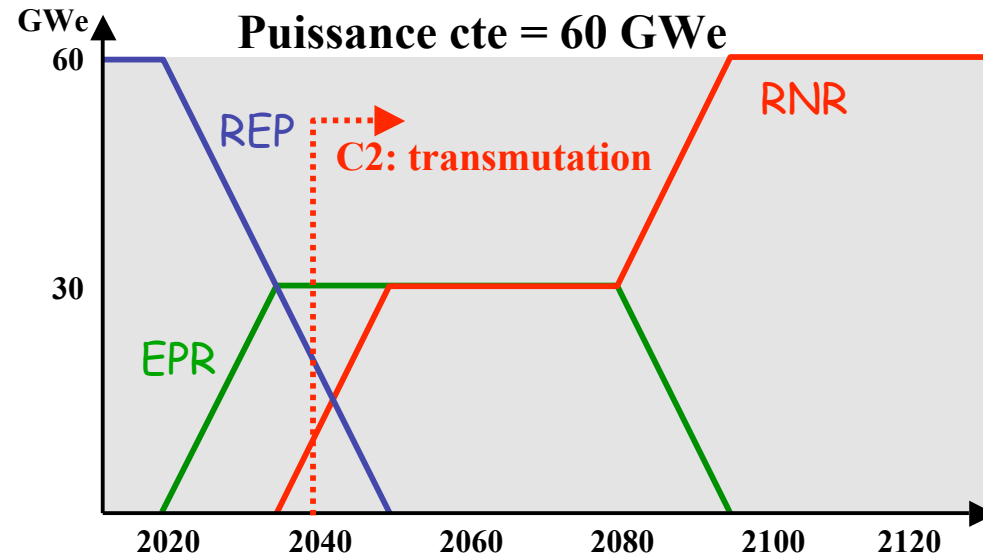
C3

Remplacement du parc actuel

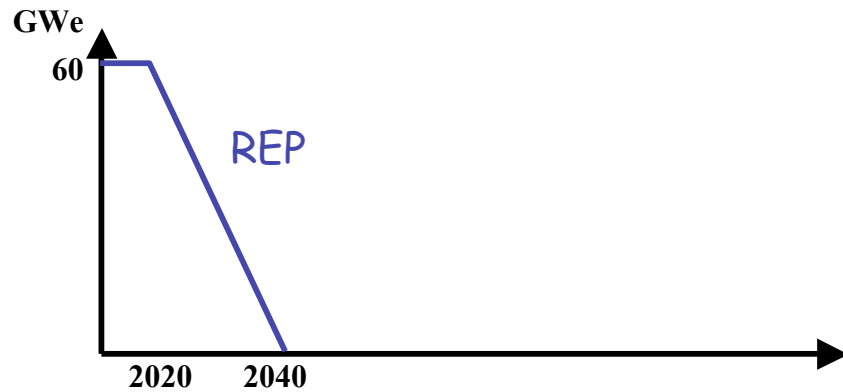
100% EPR 2020 - 2050

puis 100% RNR 2080 - 2110

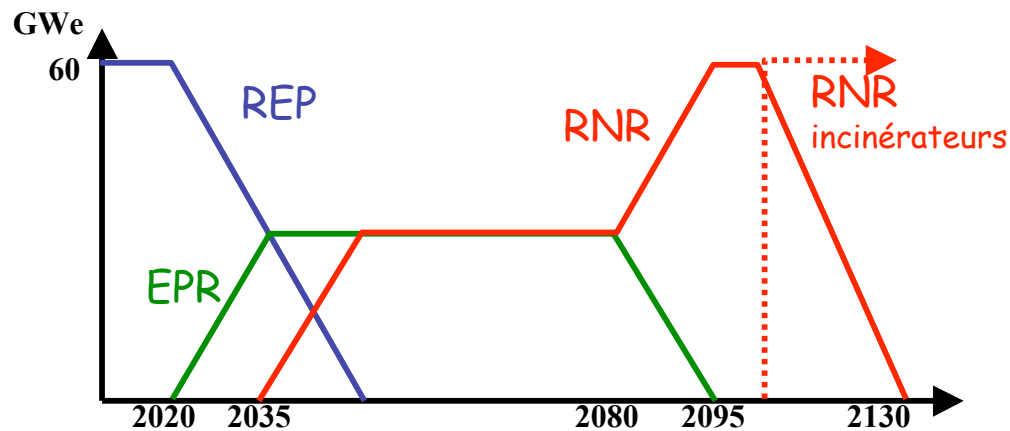
+ Transmutation des Act. Min.
en RNR dès 2080



Famille A : Arrêt du nucléaire



A1
arrêt « immédiat »
à la fin du parc actuel



A3
arrêt après le démarrage des
réacteurs à neutrons rapides
(arrêt du C2 après 2100)

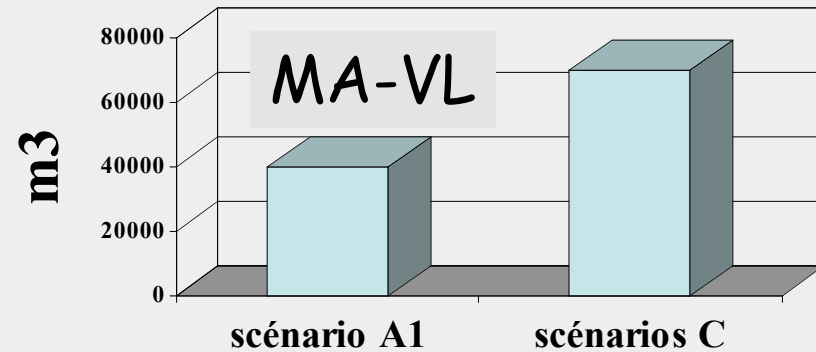
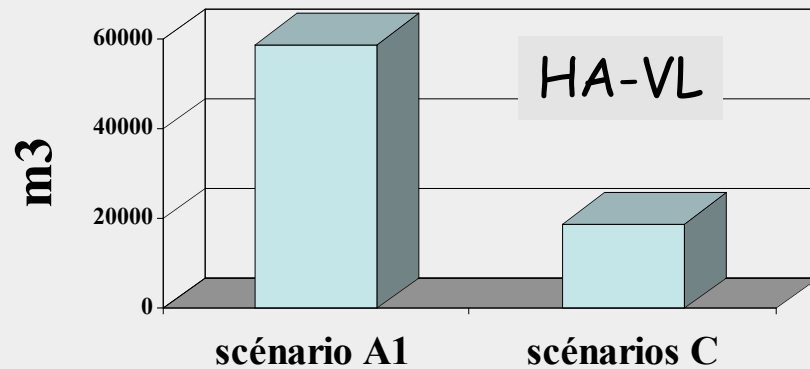
Constat 1

Comparaison A1 - C en 2130

Arrêt « tel quel » / Continuation

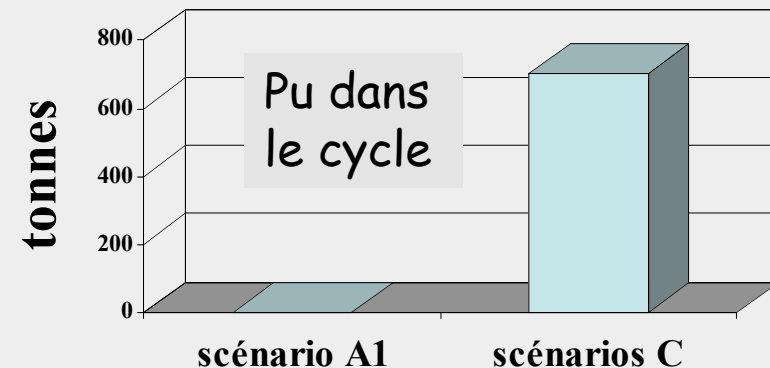
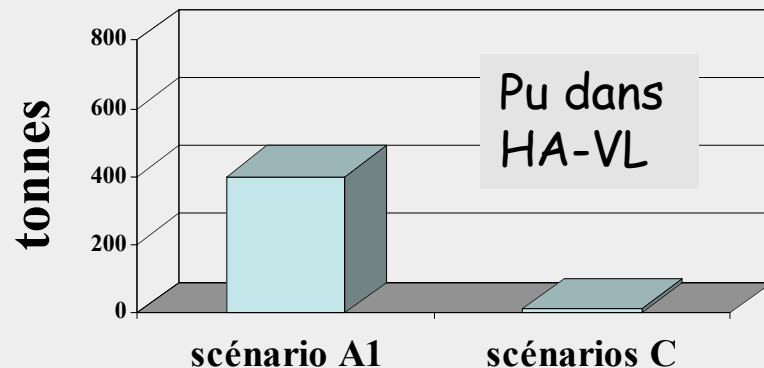
Déchets HA-VL

Arrêter « tel quel » conduit à 3 fois plus de HA-VL que si on continue



Plutonium

Continuer : pas de Pu dans les HA-VL, mais 75% en plus dans le cycle



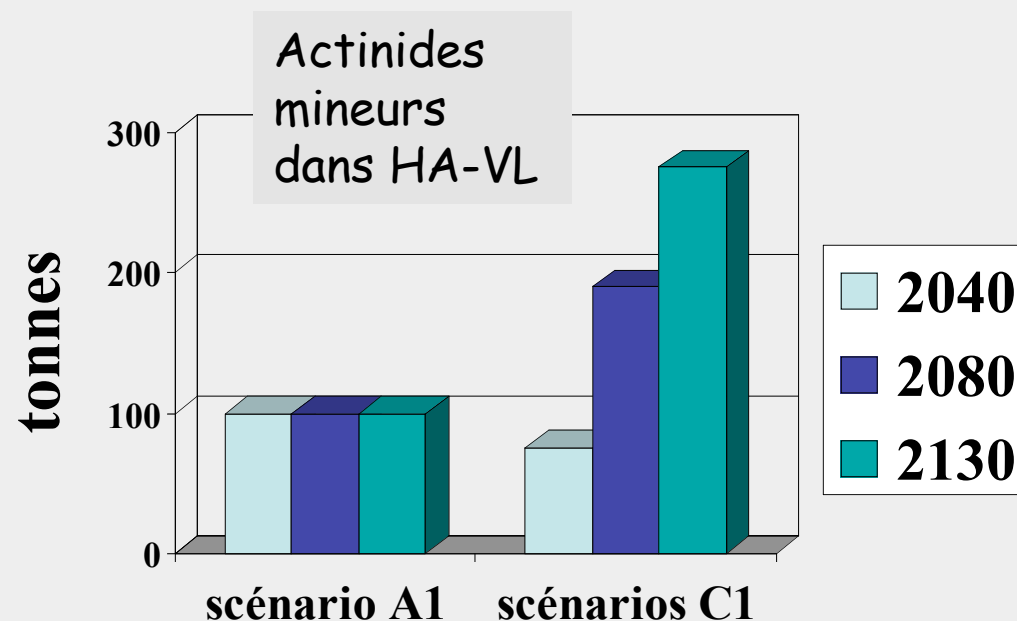
Constat 2

Comparaison A1 / C1

Du point de vue des actinides mineurs

Actinides mineurs dans les HA-VL

Le déploiement de RNR (sans transmutation) conduit à une augmentation d'un facteur 3 en 90 ans par rapport à un arrêt « tel quel »



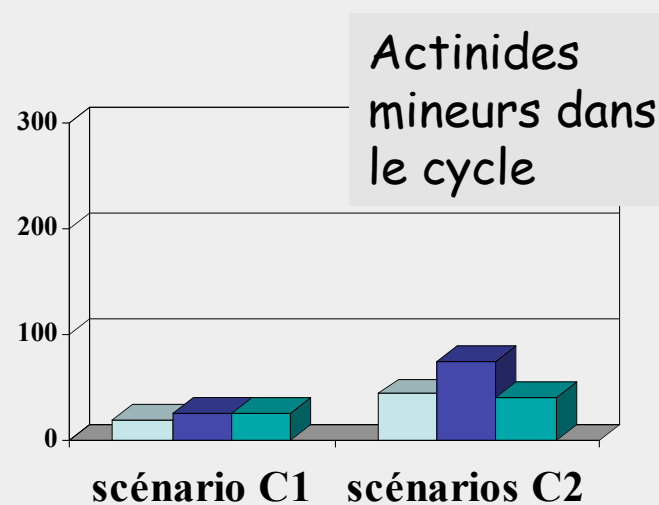
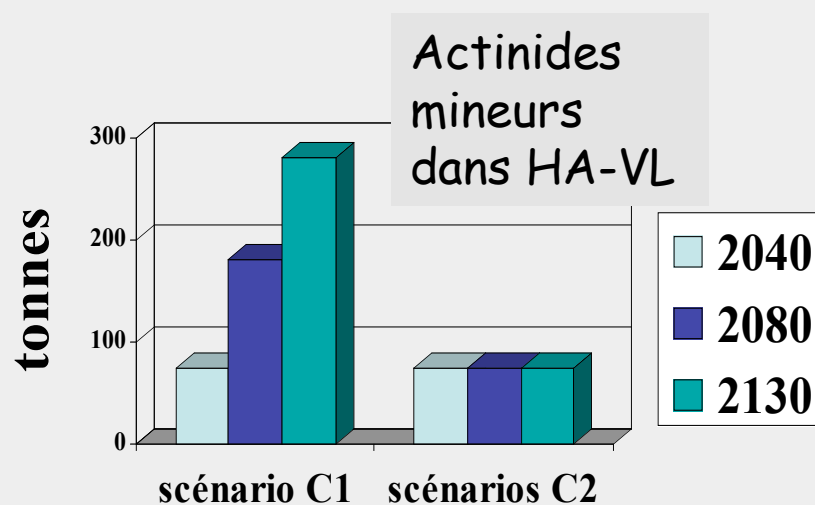
Constat 3

Comparaison C1 / C2 en 2130

⇒ Intérêt de la mise en œuvre de la transmutation

Actinides mineurs

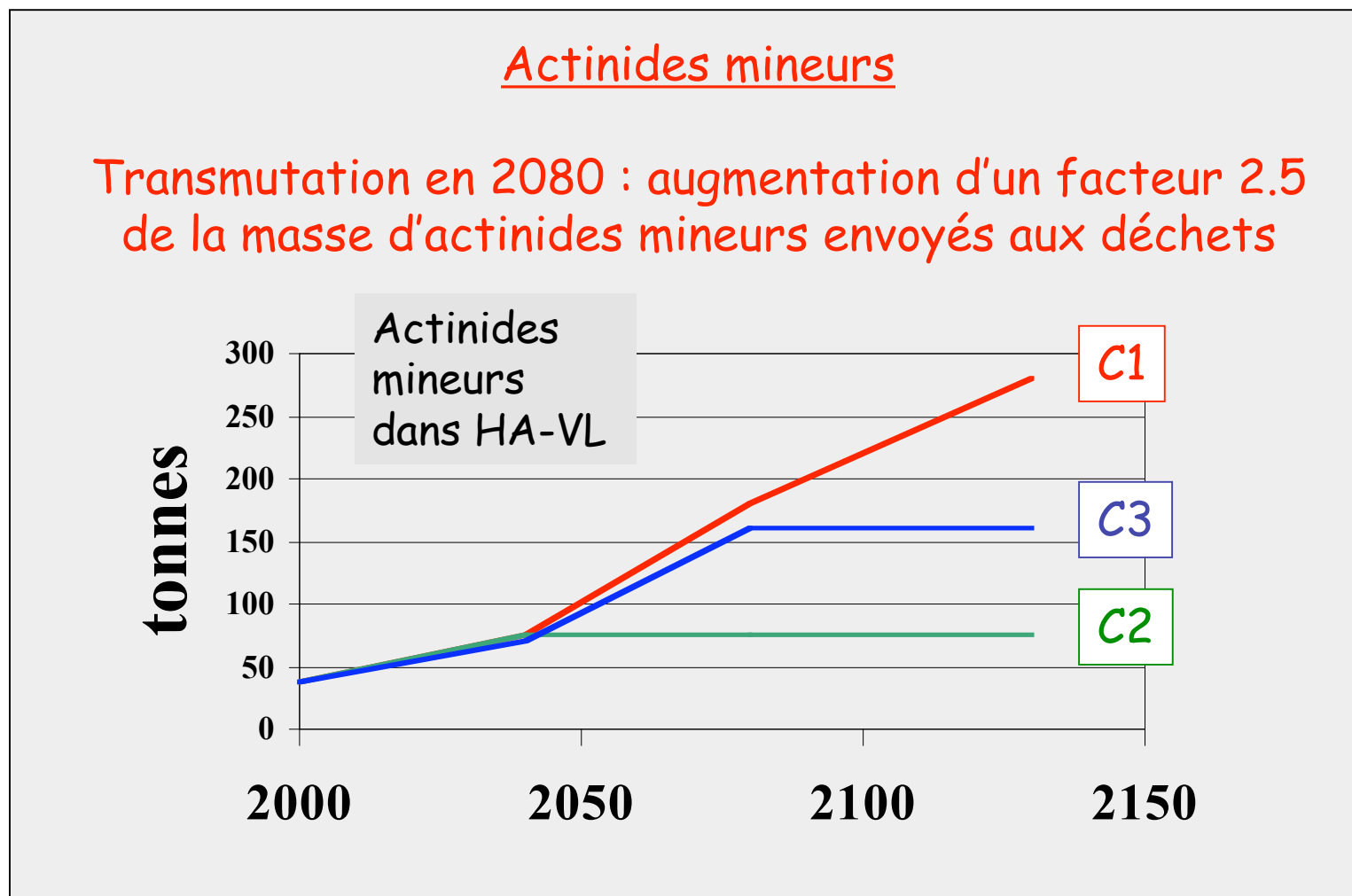
- Réduction d'un facteur 5 des A.M. envoyés aux déchets ultimes en 90 ans
- Augmentation de 70% des actinides mineurs dans le cycle
- ≈ 15% des A.M. du parc actuel sont concernés



Constat 4

Comparaison C2 / C3

⇒ Impact du retard de la mise en œuvre de la transmutation

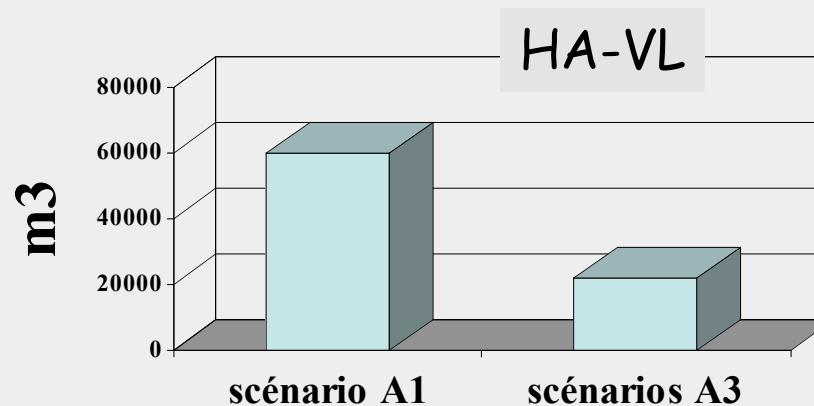
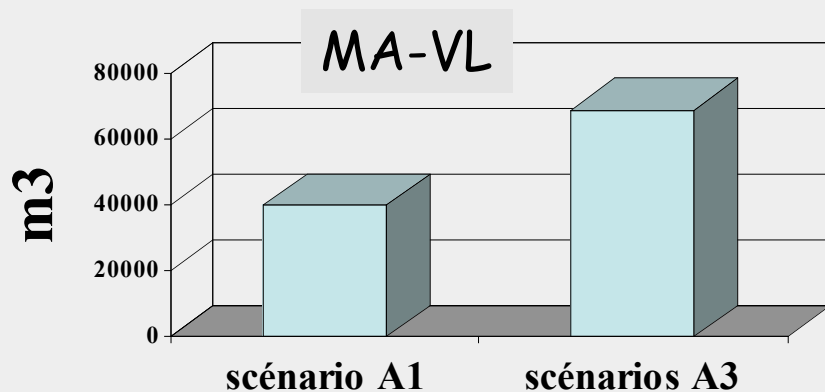


Constat 5

Comparaison A1 / A3

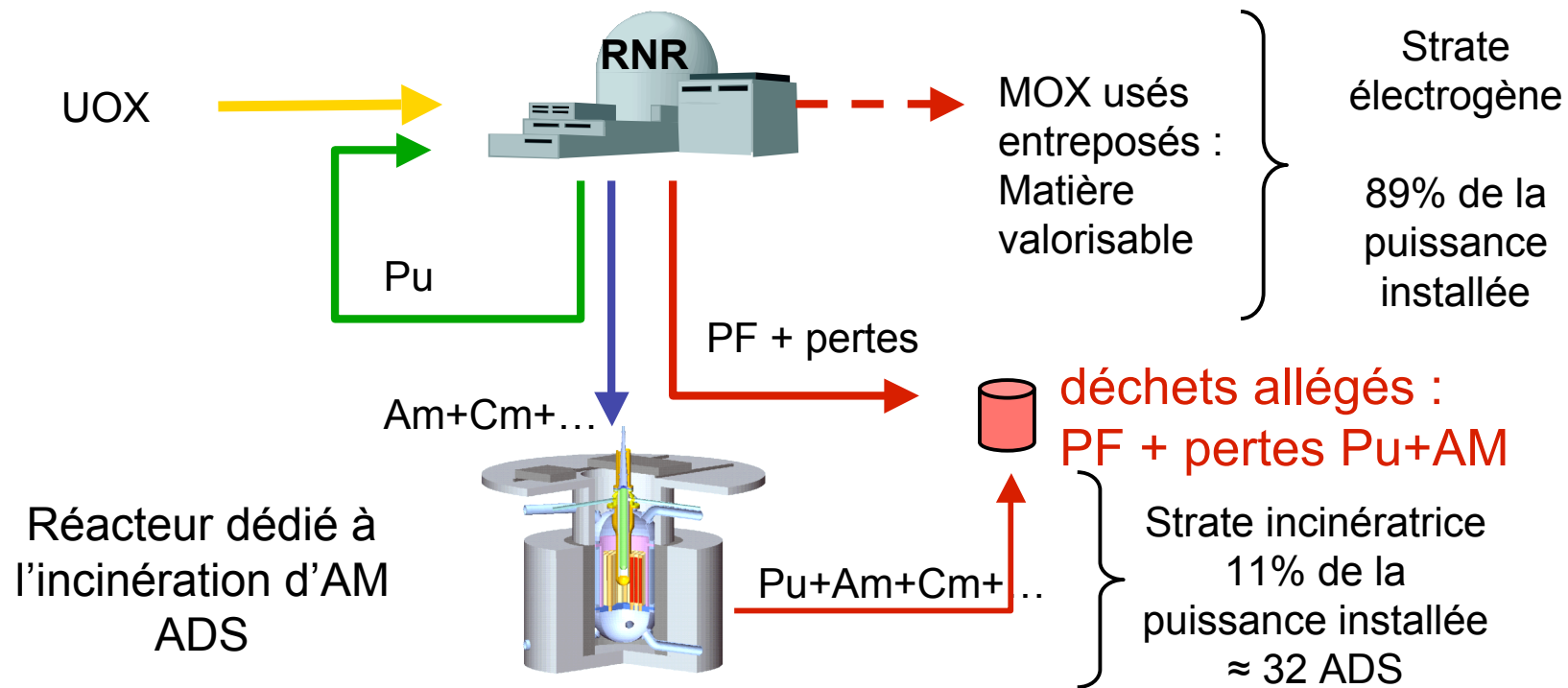
Arrêter maintenant ou après les RNR ?

- Diminution d'un facteur 3 des volumes de HA-VL avec l'option RNR
- Augmentation de 75% du volume des MA-VL si on continue



- Pu et Act. Min. dans HA-VL : IDEM à 15% près
Arrêter maintenant ou après la mise en places RNR (avec transmutation)
conduit aux mêmes inventaires de ces matières

Une variante supplémentaire : la stratégie de double strate



Combustible concentré en Actinides mineurs

- Mauvaise qualité neutronique (très peu de neutrons retardés, coefficients de température et vide positifs)
- Pilotage d'un réacteur critique jugé trop difficile
- Sous-criticité requise, besoin d'une source externe de neutrons

La stratégie double strate nécessite d'utiliser des combustibles très chargés en actinides mineurs

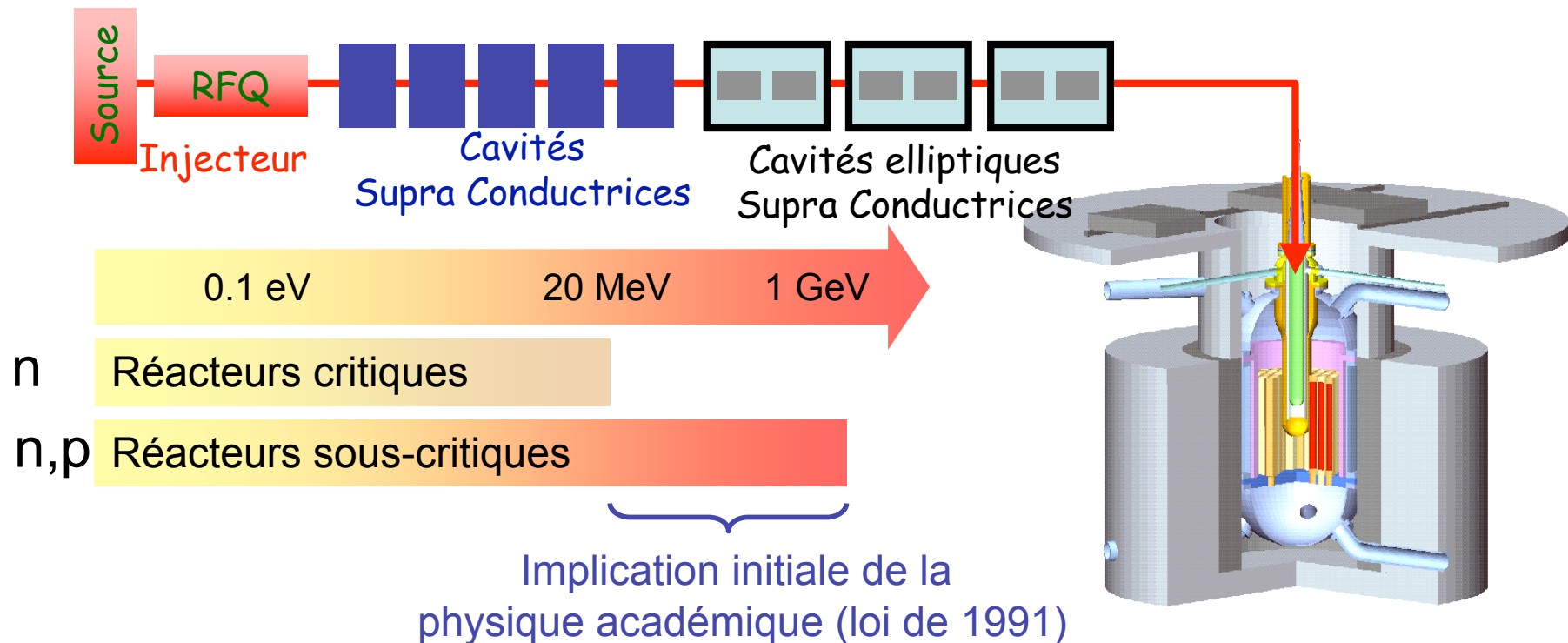
Cela complique la phase de fabrication, mais concentre les difficultés sur un volume très réduit de matière

	MOX (réf)	RNR U/Pu	RNR U/Pu/AM	RNR U/Pu +ADS AM	
Puissance résiduelle (W/g/tML)	1	X 1	X2	X70	traitement
Source neutron (n/s/tML)	1	X 1	X2	X200	
Puissance résiduelle (W/g/tML)	1	X 0,5	X2,5	X90	fabrication
Source neutron (n/s/tML)	1	X 1	X150	X20000	
t/an	820	340	340	9	

Les réacteurs dédiés à la transmutation des actinides mineurs

Réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur

- spectre rapide → fission favorisée
- combustibles Am, Cm de mauvaise qualité
- réacteurs critiques difficilement pilotables (effet de température, neutrons retardés)
- la réaction en chaîne ne s'entretient pas
- il faut alimenter le réacteur en neutrons



Un champs de recherche nouveau : forte implication de la physique académique

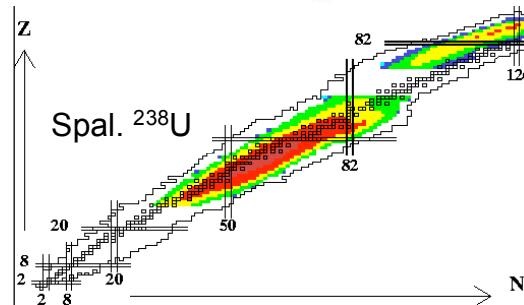
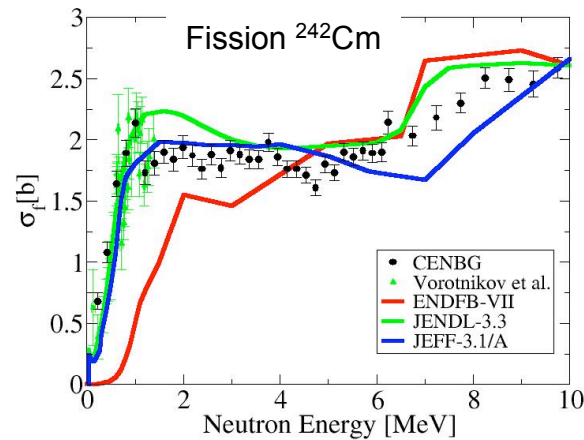
Expérience Guinevere
Multiplication en milieu sous critique



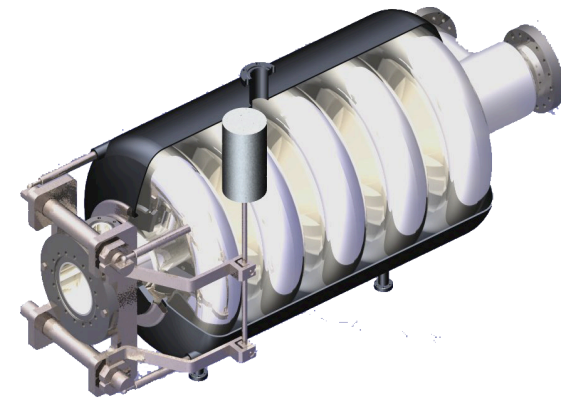
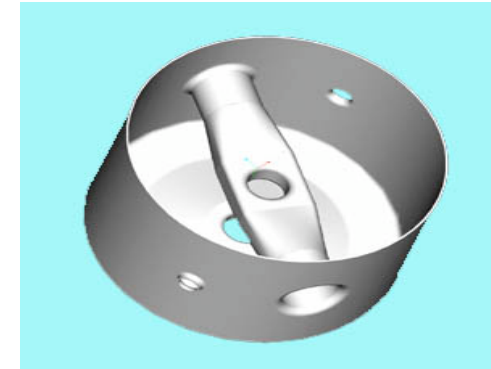
MEGAPIE (PSI)
Tenue des matériaux sous irradiation et sous circulation de Pb-Bi



Données nucléaires pour la transmutation
Spallation
Neutrons



R&D accélérateurs de protons de haute intensité



Europe : décision attendue vers 2010-2012 sur la construction d'un démo ≈ 100 MWth
France : loi 2006, décision attendue en 2012 sur le choix homogène / ADS

En conclusion

La gestion des déchets actuelle est conditionnée par la vitrification considérée comme irréversible

Le stockage à terme irréversible est donc la solution de référence

Pour le futur, beaucoup de choses dépendront de la part du nucléaire.

Si elle augmente significativement, la transmutation des actinides mineurs semble une option réaliste : elle sera utile pour réduire la taille des sites de stockage, et elle sera possible grâce aux neutrons rapides

Si le nucléaire se développe peu, il faudra des volontés politiques fortes pour mettre en œuvre la transmutation : sites de stockage suffisants et recours à des technologies complexes non compétitives.

Enfin, plus on fera de nucléaire, moins on fera de déchets à vie longue...