

THORIUM : POULIDOR DU NUCLEAIRE Le meilleur part second

Adrien Bidaud¹, et al....

¹ Laboratoire de Physique Subatomique, LPSC/IN2P3/CNRS, Univ. Grenoble-Alpes, Grenoble, France
bidaud@lpsc.in2p3.fr



In2p3



Th et Poulidor : Chouchous du public



Cycles U/Pu et Th/U à la lutte dans le Puy de Dôme

Th et Poulidor : Chouchous du public



Poulidor

Cycles U/Pu et Th/U à la lutte dans le Puy de Dôme

Cycle du Thorium

Th et Poulidor : Chouchous du public



Poulidor

Nombreuses victoires contre
Anquetil puis Merckx
(5 tours de France chacun)

Cycles U/Pu et Th/U à la lutte dans le Puy de Dôme

Cycle du Thorium

Th et Poulidor : Chouchous du public



Poulidor

Nombreuses victoires contre
Anquetil puis Merckx
(5 tours de France chacun)

Cycles U/Pu et Th/U à la lutte dans le Puy de Dôme

Cycle du Thorium

ThO₂ Meilleur oxyde

Th et Poulidor : Chouchous du public



Poulidor

Nombreuses victoires contre
Anquetil puis Merckx
(5 tours de France chacun)

Cycles U/Pu et Th/U à la lutte dans le Puy de Dôme

Cycle du Thorium

ThO₂ Meilleur oxyde

U233 Meilleur fissile

Spectre thermique ET rapide

Prod Actinides Mineurs réduites

Th et Poulidor : Chouchous du public



Poulidor

Nombreuses victoires contre
Anquetil puis Merckx
(5 tours de France chacun)
6 podiums, 0 maillot jaune !
Arrive toujours second

Cycles U/Pu et Th/U à la lutte dans le Puy de Dôme

Cycle du Thorium

ThO₂ Meilleur oxyde

U233 Meilleur fissile

Spectre thermique ET rapide

Prod Actinides Mineurs réduites

Th et Poulidor : Chouchous du public



Poulidor

Nombreuses victoires contre
Anquetil puis Merckx
(5 tours de France chacun)
6 podiums, 0 maillot jaune !
Arrive toujours second

Cycles U/Pu et Th/U à la lutte dans le Puy de Dôme

Cycle du Thorium

ThO₂ Meilleur oxyde

U233 Meilleur fissile

Spectre thermique ET rapide

Prod Actinides Mineurs réduites

Pas de fissile naturel

=> Part second !

Th et Poulidor : Chouchous du public



Poulidor

Nombreuses victoires contre
Anquetil puis Merckx

(5 tours de France chacun)

6 podiums, 0 maillot jaune !

Arrive toujours second

Personnalité favorite des français

Cycles U/Pu et Th/U à la lutte dans le Puy de Dôme

Cycle du Thorium

ThO₂ Meilleur oxyde

U233 Meilleur fissile

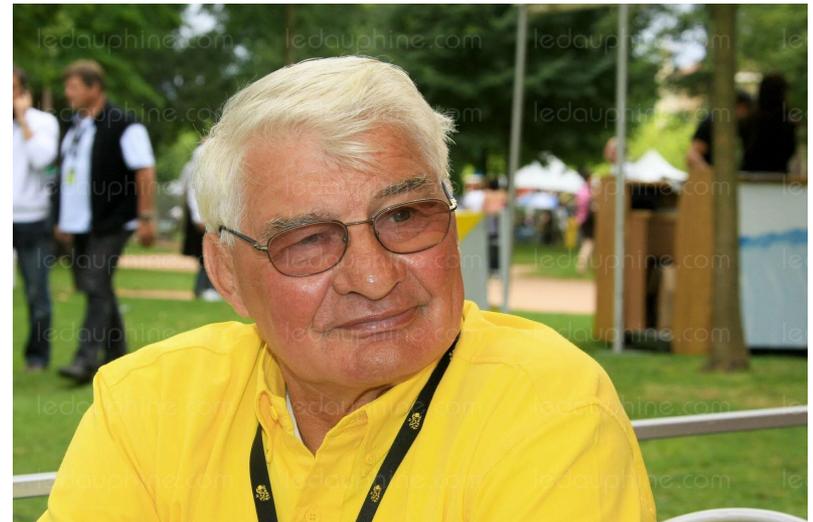
Spectre thermique ET rapide

Prod Actinides Mineurs réduites

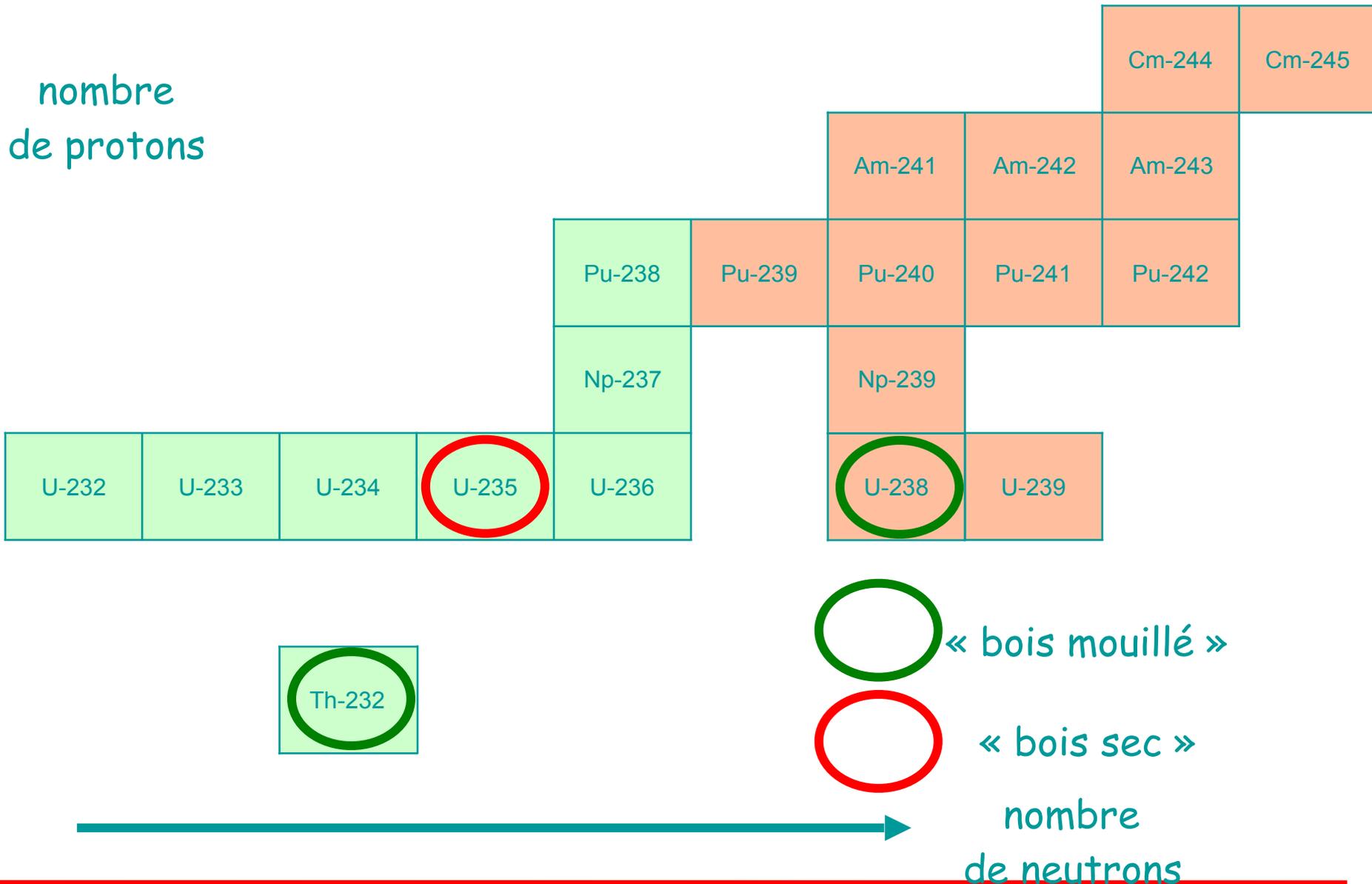
Pas de fissile naturel

=> Part second !

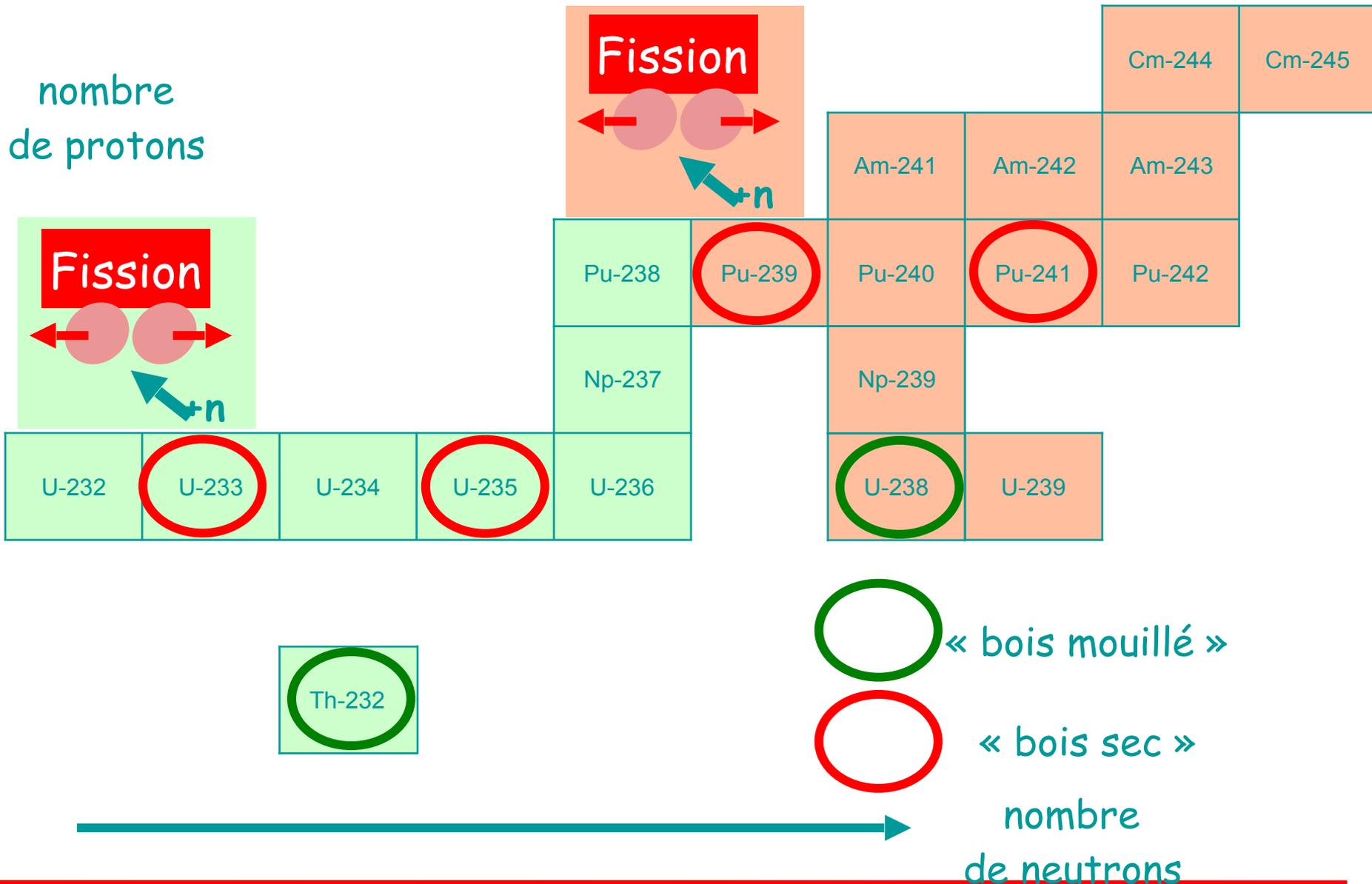
Cycle préféré des médias ?



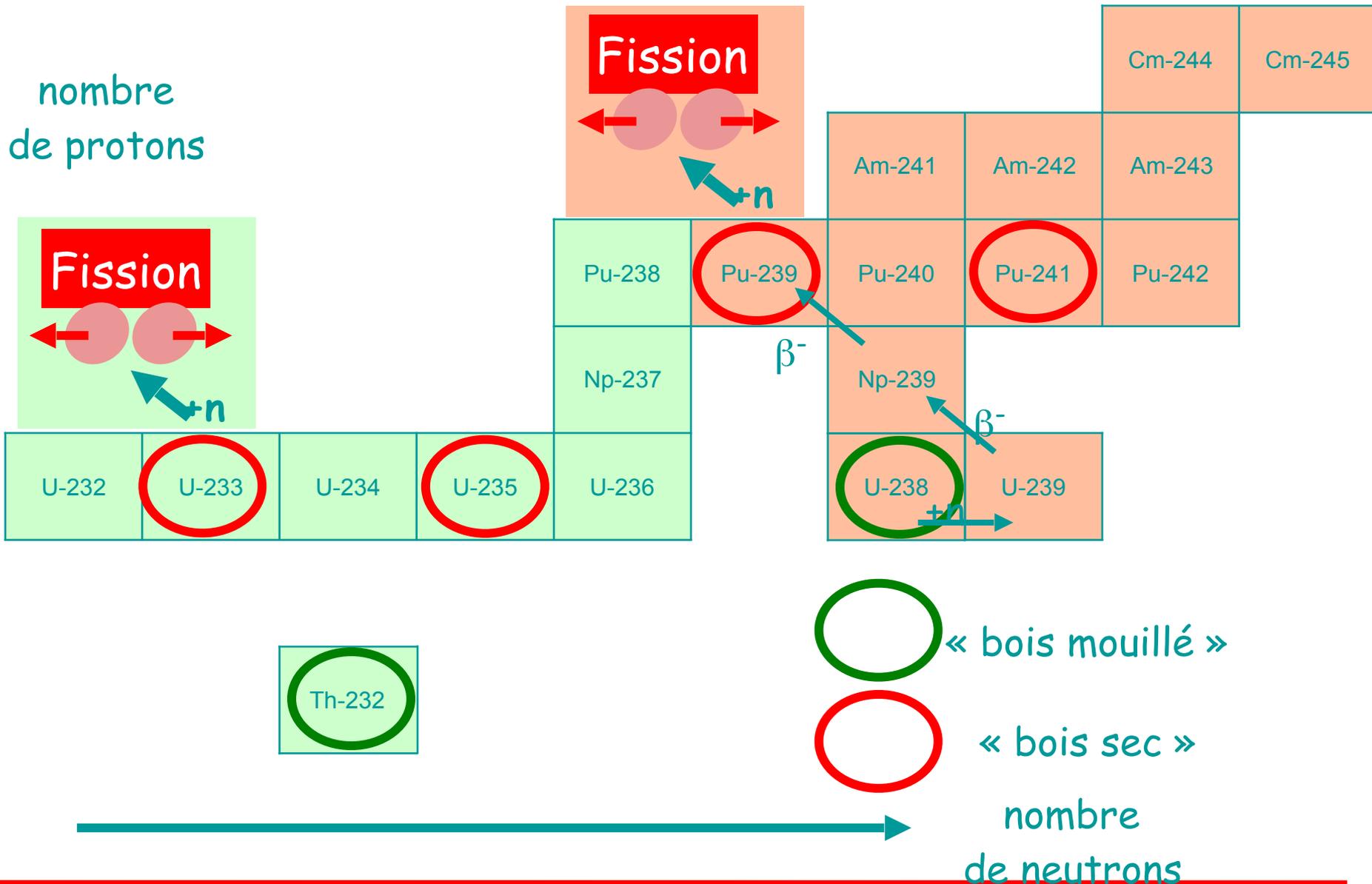
Production des fissiles



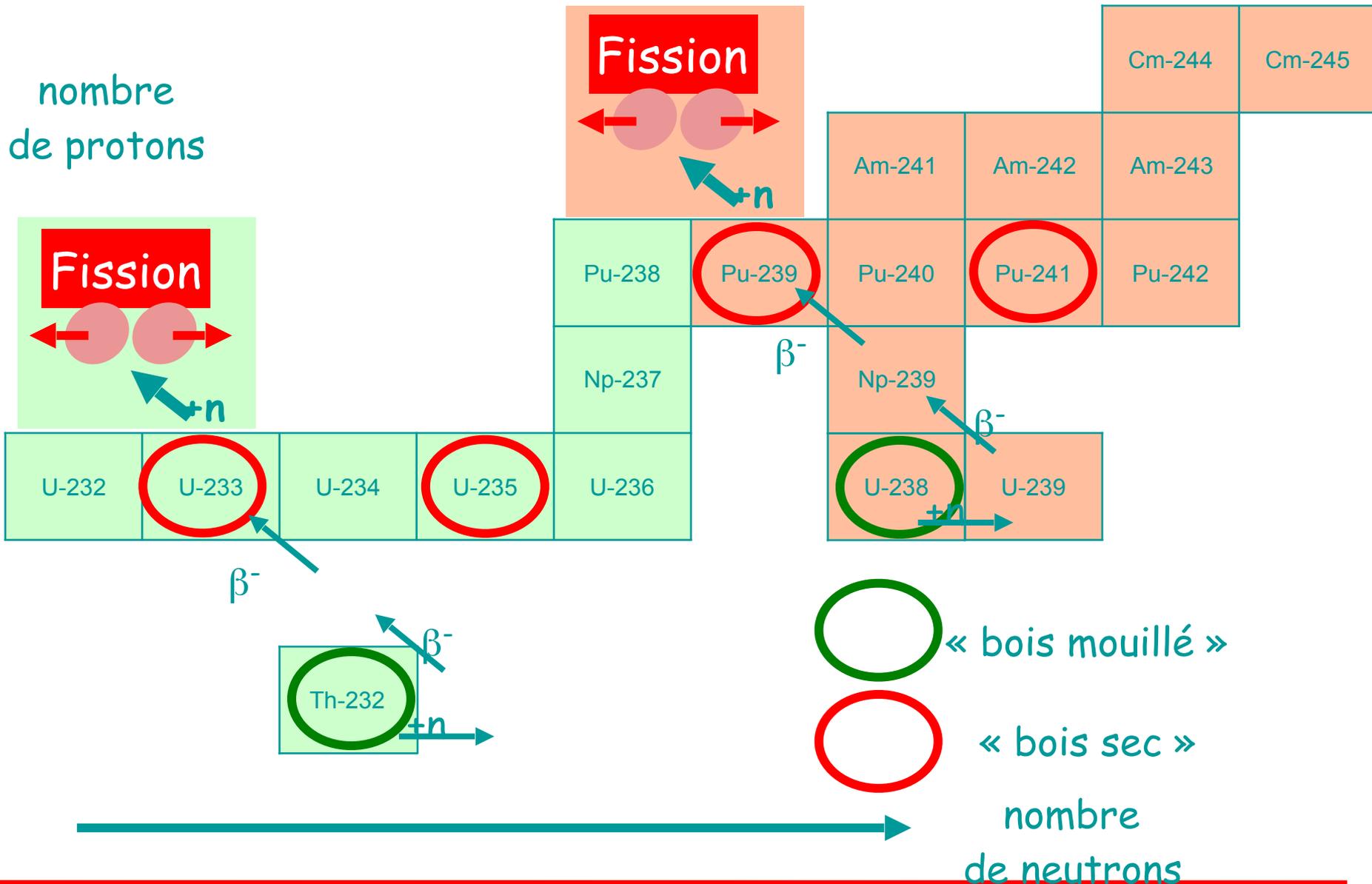
Production des fissiles



Production des fissiles



Production des fissiles



Régénération (1/2)

La régénération a besoin de neutrons

Pour une fission



ν neutrons sont produits



1 neutron induit la fission

α neutrons capturés = $\sigma^{\text{cap}} / \sigma^{\text{fis}}$ du noyau fissile

$1 + \alpha$ neutrons capturés sur le fertile pour régénérer le fissile

$\nu - 2 (1 + \alpha) > 0 \Rightarrow$ régénération possible

$< 0 \Rightarrow$ régénération impossible

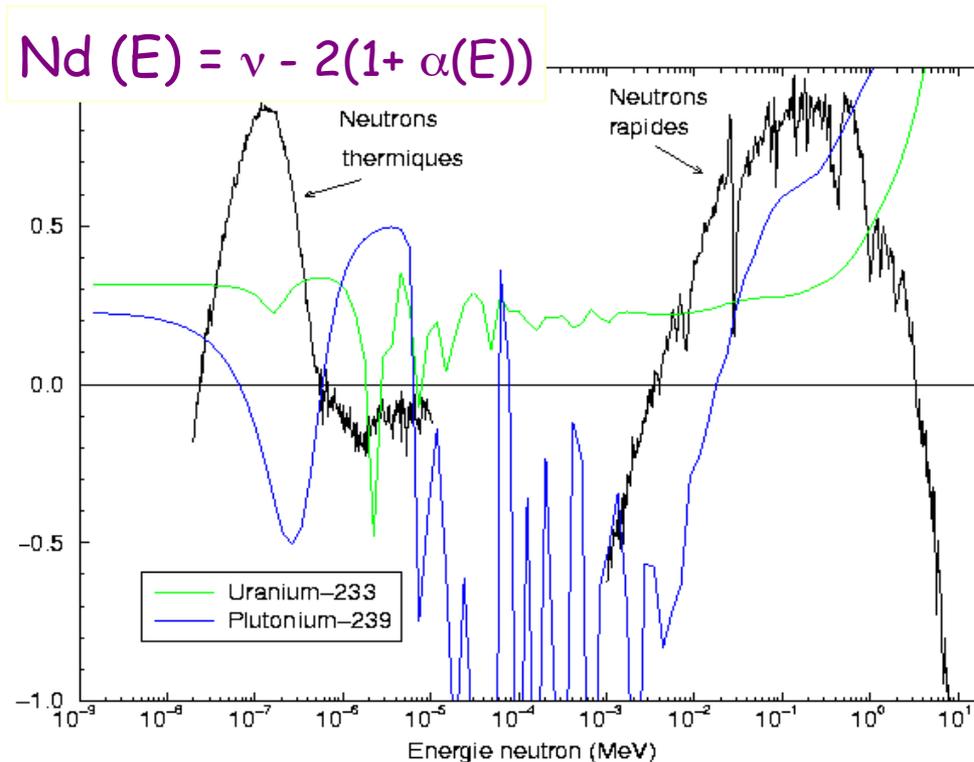
$$\nu \text{ et } \alpha = \frac{\sigma_{\text{fissile}}^{\text{capture}}}{\sigma_{\text{fissile}}^{\text{fission}}}$$

\rightarrow Caractéristiques du noyau **fissile** uniquement

Régénération (2/2)



Régénération (2/2)

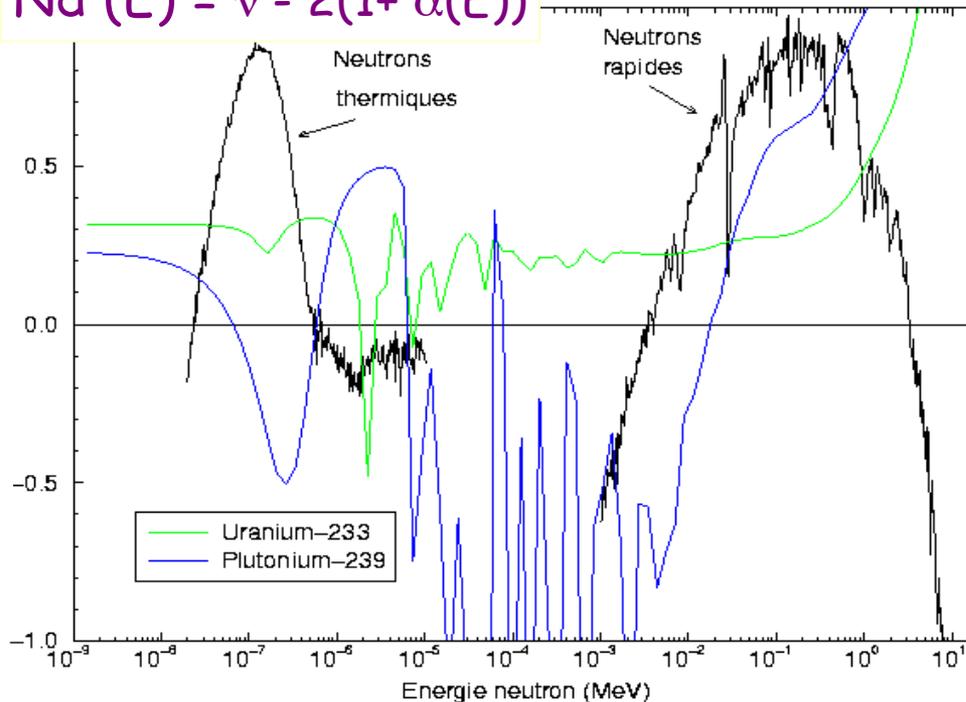


Régénération (2/2)



$$\text{Nd}(E) = \nu - 2(1 + \alpha(E))$$

Spectre thermique



Spectre rapide

Th/U Nd > 0

Th/U Nd > 0

U/Pu Nd < 0

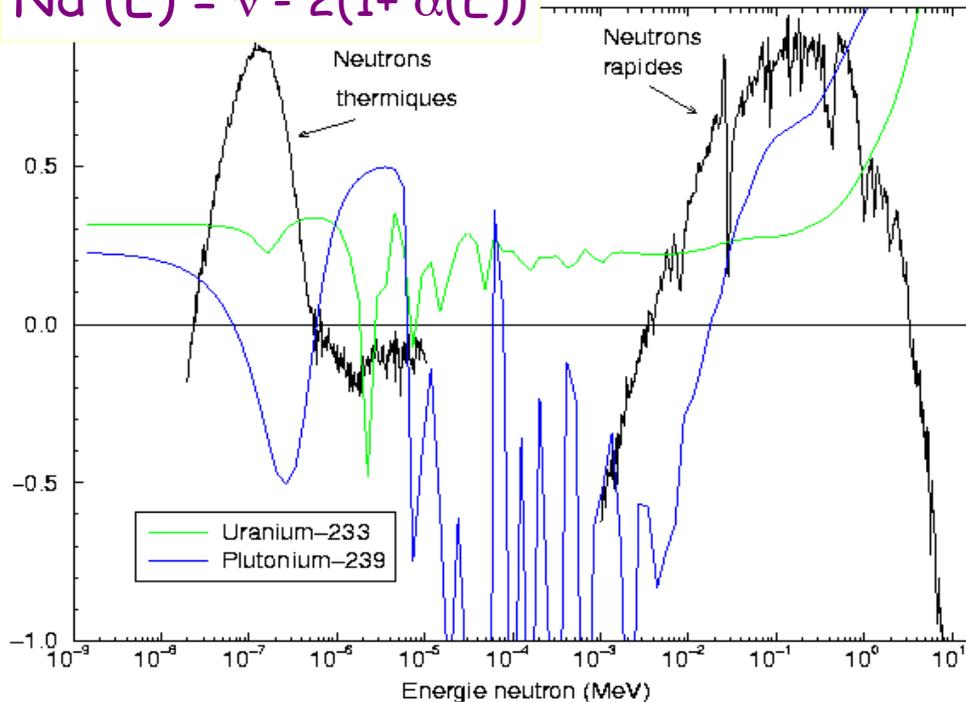
U/Pu Nd > 0

Régénération (2/2)



$$\text{Nd}(E) = \nu - 2(1 + \alpha(E))$$

Spectre thermique



Spectre rapide

Th/U Nd > 0

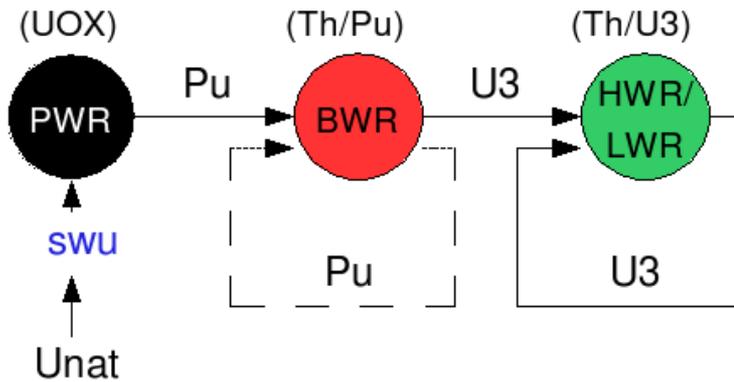
Th/U Nd > 0

U/Pu Nd < 0

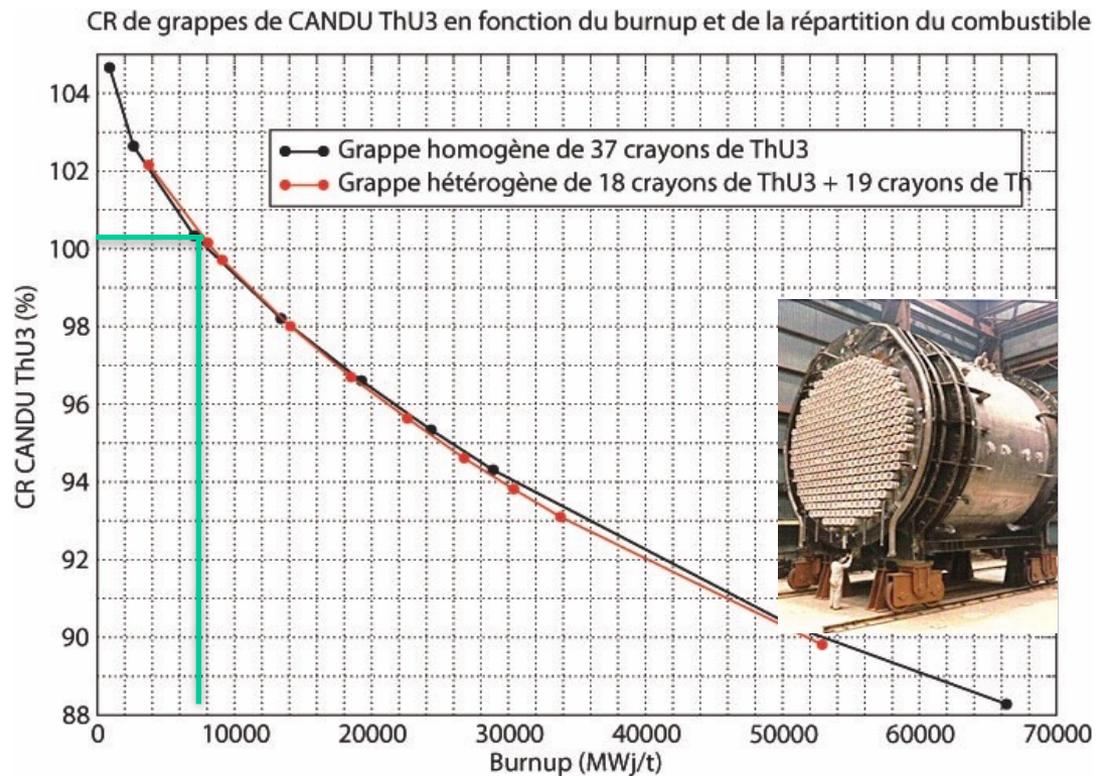
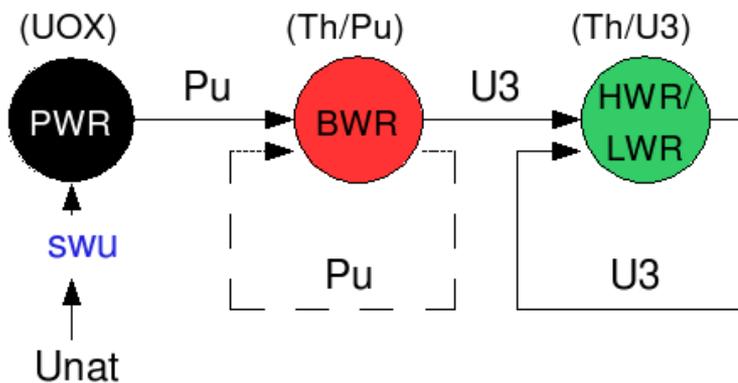
U/Pu Nd > 0

U233 et donc cycle Th/U plus « souple »

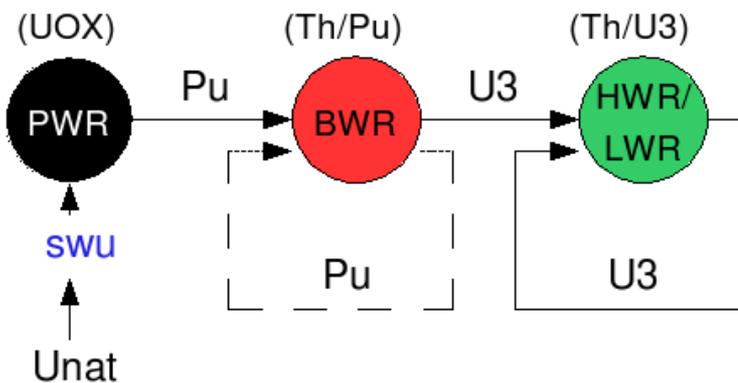
Utilisation en spectre thermique



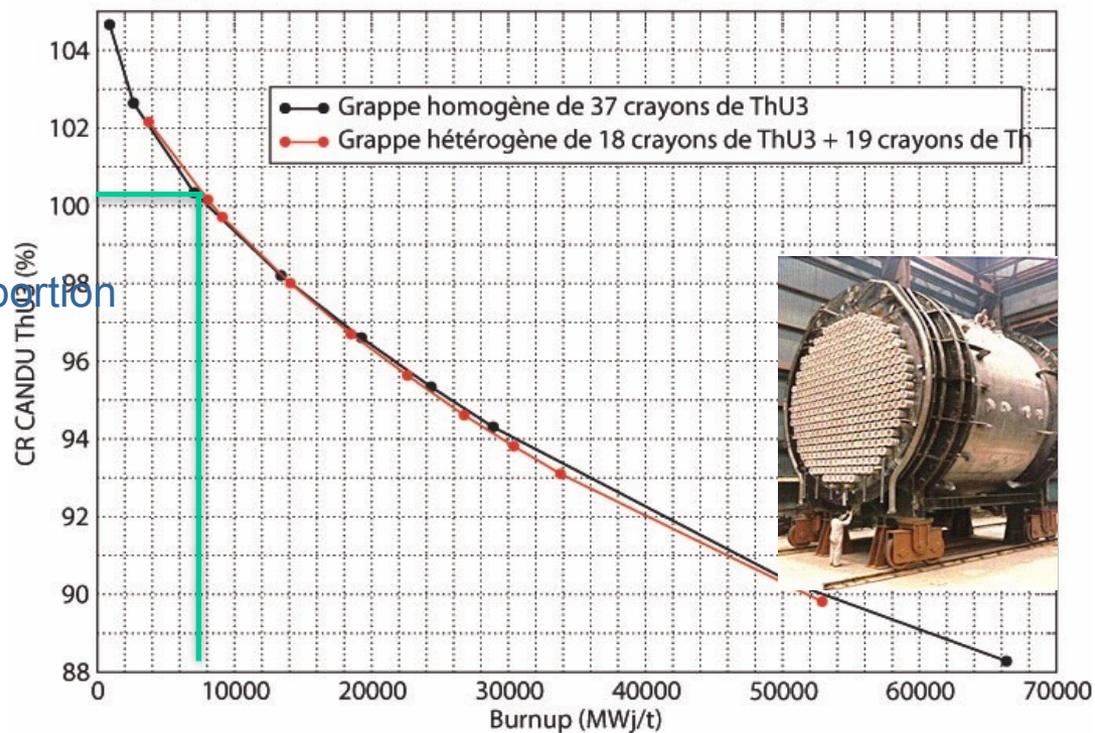
Utilisation en spectre thermique



Utilisation en spectre thermique

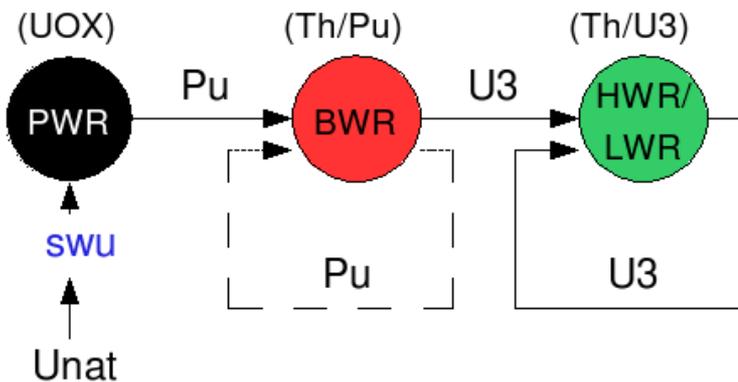


CR de grappes de CANDU ThU3 en fonction du burnup et de la répartition du combustible

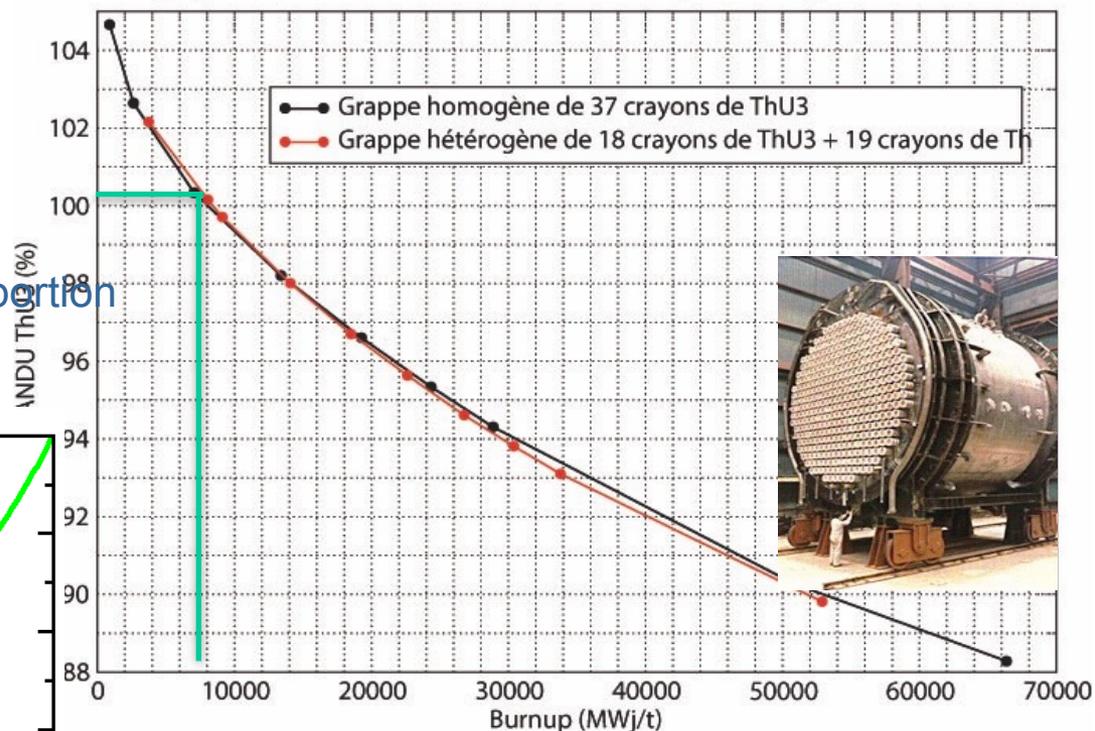


Pour un taux de conversion donné, la proportion entre ces 3 composants est fixée

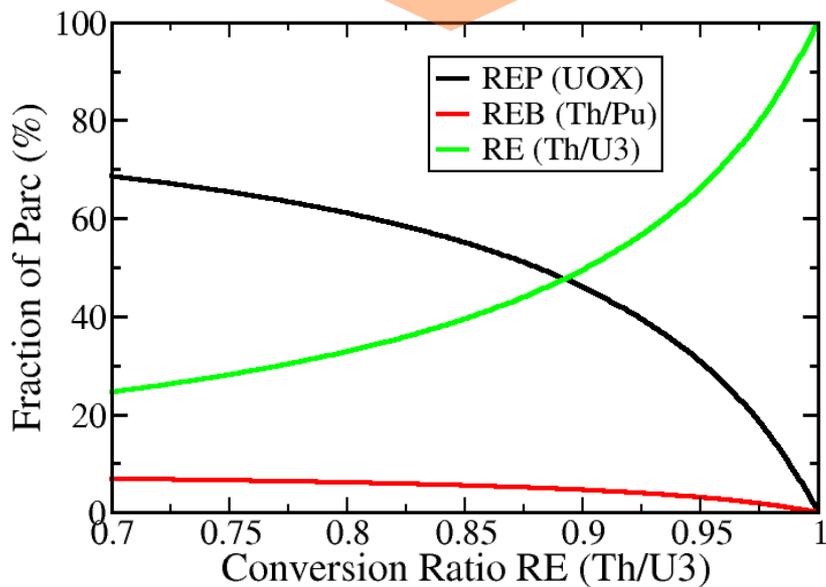
Utilisation en spectre thermique



CR de grappes de CANDU ThU3 en fonction du burnup et de la répartition du combustible



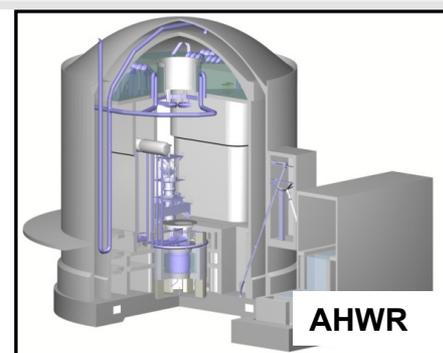
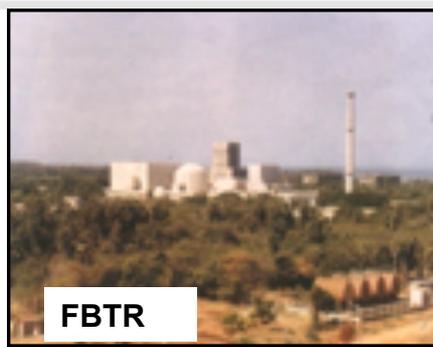
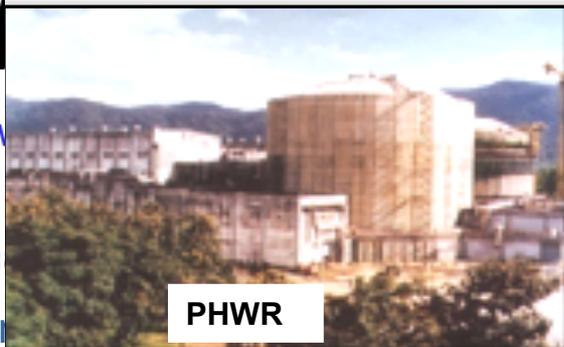
Pour un taux de conversion donné, la proportion entre ces 3 composants est fixée



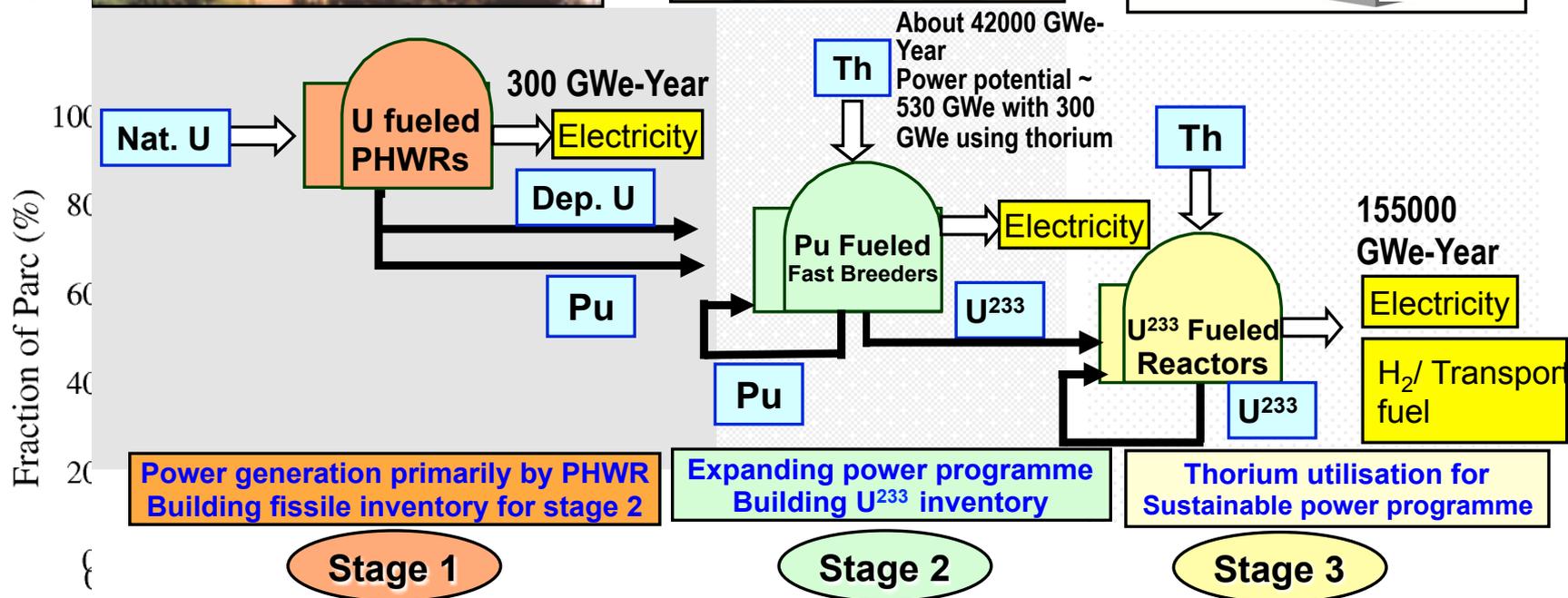
Utilisation en spectre thermique

Resource sustainability is the main goal of Indian three stage nuclear power programme

(UO)
PW
SW
Un



ombustible



Thorium en combustible solide

Performance combustible

Thorium en combustible solide

Performance combustible

	UO ₂	ThO ₂
Theoretical density	11,7	10
Thermal conductivity (w.m ⁻¹ .K ⁻¹)	3 to 4 (1)	5 (1)
Melting point (°C)	2800	3300

Thorium en combustible solide

Performance combustible

	UO ₂	ThO ₂
Theoretical density	11,7	10
Thermal conductivity (w.m ⁻¹ .K ⁻¹)	3 to 4 (1)	5 (1)
Melting point (°C)	2800	3300

Avantage Thorium

Bonnes performances démontrées en combustibles plus exotiques

Thorium en combustible solide

Performance combustible

	UO ₂	ThO ₂
Theoretical density	11,7	10
Thermal conductivity (w.m ⁻¹ .K ⁻¹)	3 to 4 (1)	5 (1)
Melting point (°C)	2800	3300

Avantage Thorium

Bonnes performances démontrées en combustibles plus exotiques

Neutronique coeur RNR (pas CFV)

Thorium en combustible solide

Performance combustible

	UO ₂	ThO ₂
Theoretical density	11,7	10
Thermal conductivity (w.m ⁻¹ .K ⁻¹)	3 to 4 (1)	5 (1)
Melting point (°C)	2800	3300

Avantage Thorium

Bonnes performances démontrées en combustibles plus exotiques

Neutronique coeur RNR (pas CFV)

Cycle	U/Pu	Th/U
β_{eff} (pcm)	331	350
$\Delta\rho$ (\$) debut de cycle	5.54	-0.59
$\Delta\rho$ (\$) cycle équilibre	6.06	0.66

Thorium en combustible solide

Performance combustible

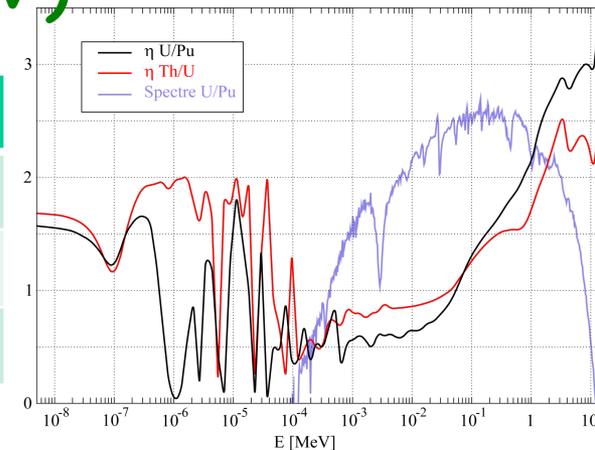
	UO ₂	ThO ₂
Theoretical density	11,7	10
Thermal conductivity (w.m ⁻¹ .K ⁻¹)	3 to 4 (1)	5 (1)
Melting point (°C)	2800	3300

Avantage Thorium

Bonnes performances démontrées en combustibles plus exotiques

Neutronique coeur RNR (pas CFV)

Cycle	U/Pu	Th/U
β_{eff} (pcm)	331	350
$\Delta\rho$ (\$) debut de cycle	5.54	-0.59
$\Delta\rho$ (\$) cycle équilibre	6.06	0.66



Thorium en combustible solide

Performance combustible

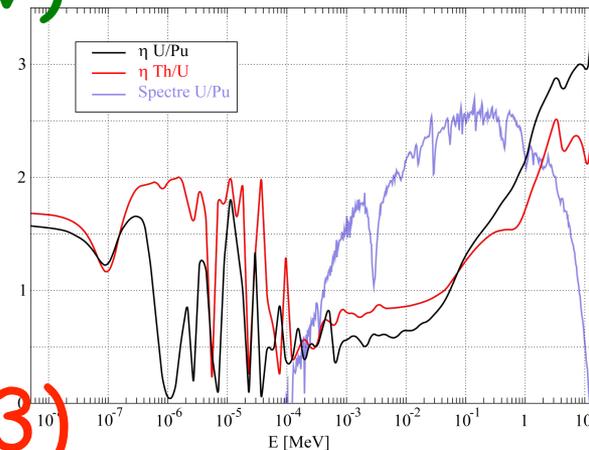
	UO ₂	ThO ₂
Theoretical density	11,7	10
Thermal conductivity (w.m ⁻¹ .K ⁻¹)	3 to 4 (1)	5 (1)
Melting point (°C)	2800	3300

Avantage Thorium

Bonnes performances démontrées en combustibles plus exotiques

Neutronique coeur RNR (pas CFV)

Cycle	U/Pu	Th/U
β_{eff} (pcm)	331	350
$\Delta\rho$ (\$) debut de cycle	5.54	-0.59
$\Delta\rho$ (\$) cycle équilibre	6.06	0.66

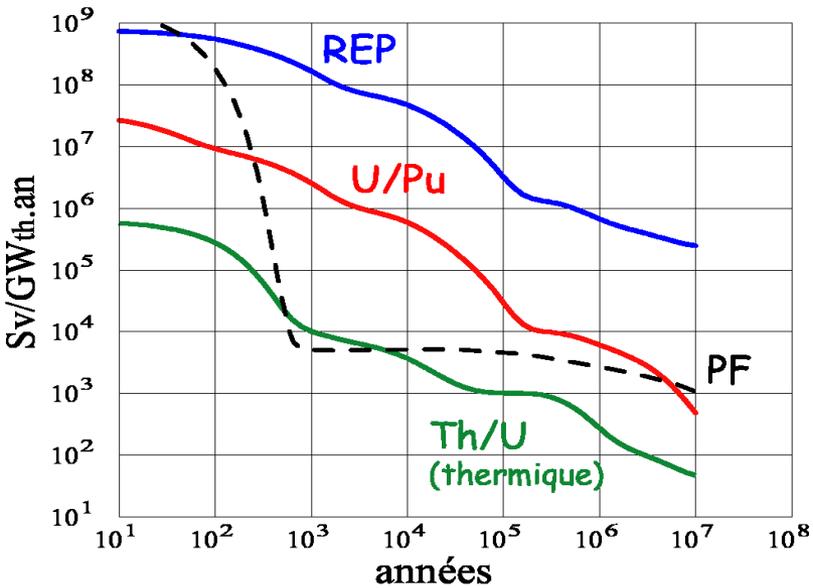


Avantage Thorium (en fait U233)

Moindre régénération \Leftrightarrow Meilleur coefficient de vidange

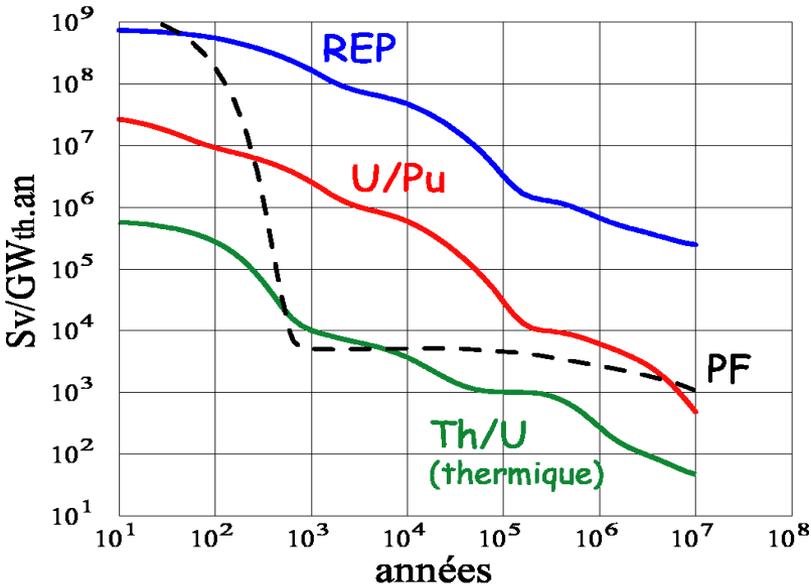
Transmutation en RNR

radiotoxicité $R(t)$ des rejets d'actinides à l'équilibre



Transmutation en RNR

radiotoxicité $R(t)$ des rejets d'actinides à l'équilibre



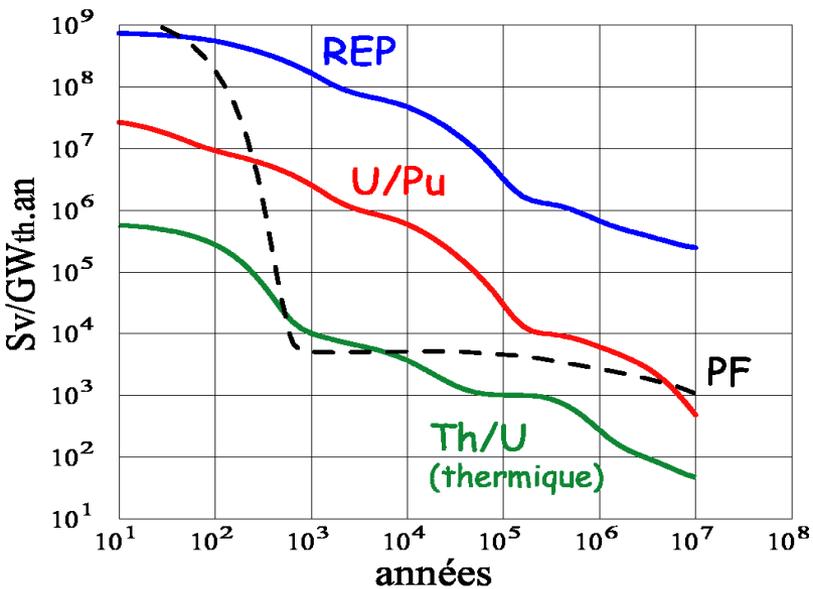
<- REP cycle ouvert

<- RNR U/Pu

<- Th/U séparation poussée

Transmutation en RNR

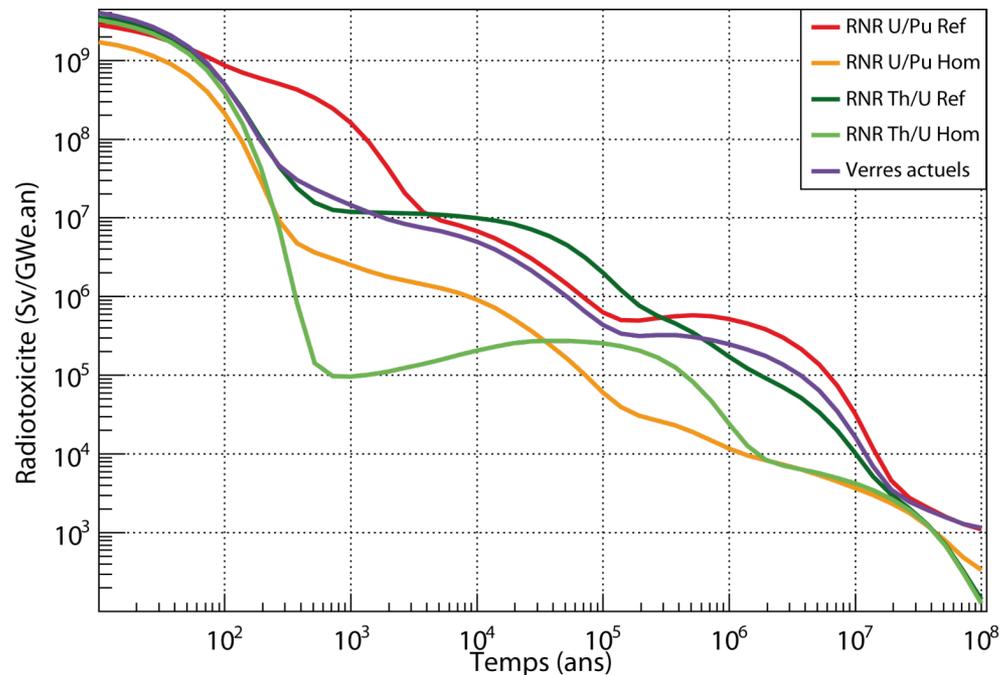
radiotoxicité $R(t)$ des rejets d'actinides à l'équilibre



<- REP cycle ouvert

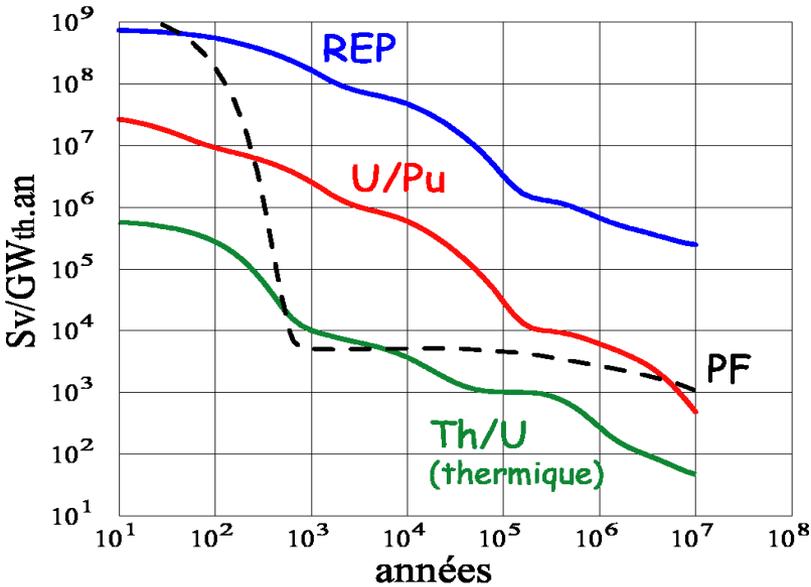
<- RNR U/Pu

<- Th/U séparation poussée



Transmutation en RNR

radiotoxicité $R(t)$ des rejets d'actinides à l'équilibre

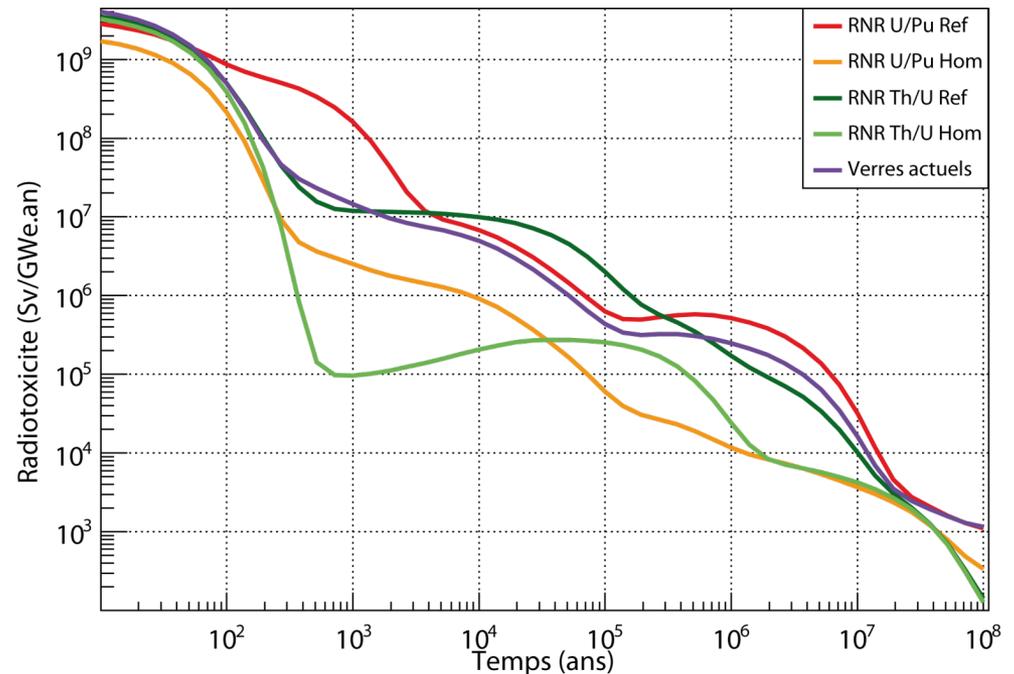


<- REP cycle ouvert

<- RNR U/Pu

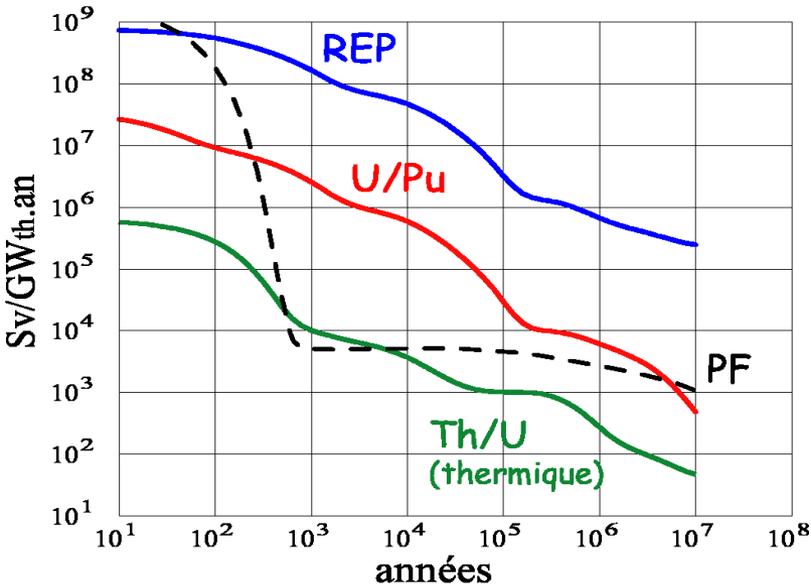
<- Th/U séparation poussée

RNR Na U/Pu vs Th/U



Transmutation en RNR

radiotoxicité $R(t)$ des rejets d'actinides à l'équilibre

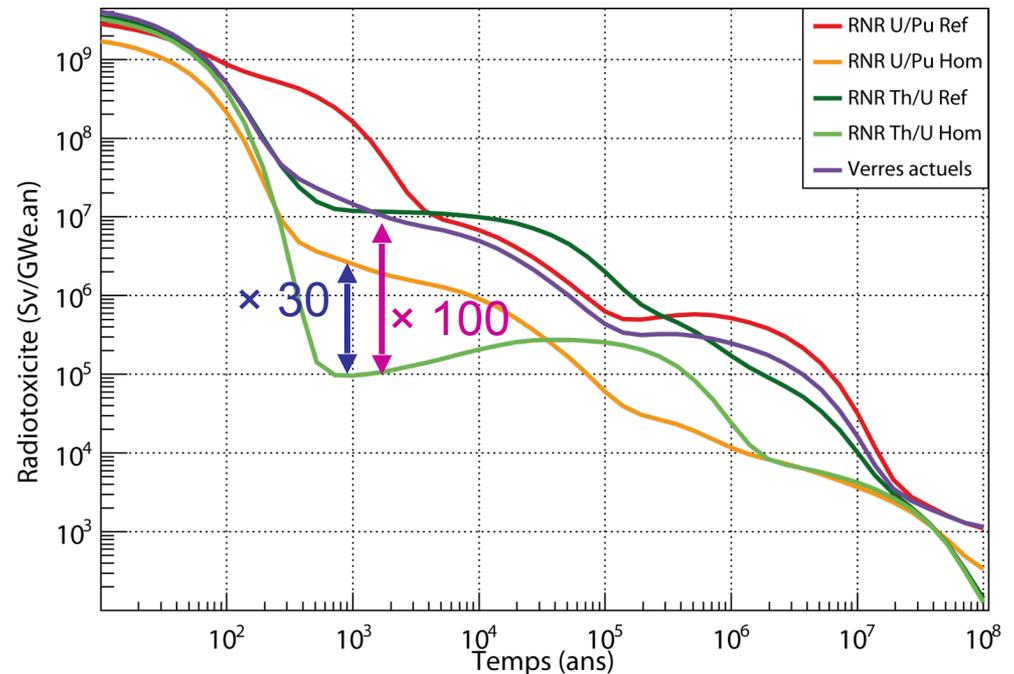


<- REP cycle ouvert

<- RNR U/Pu

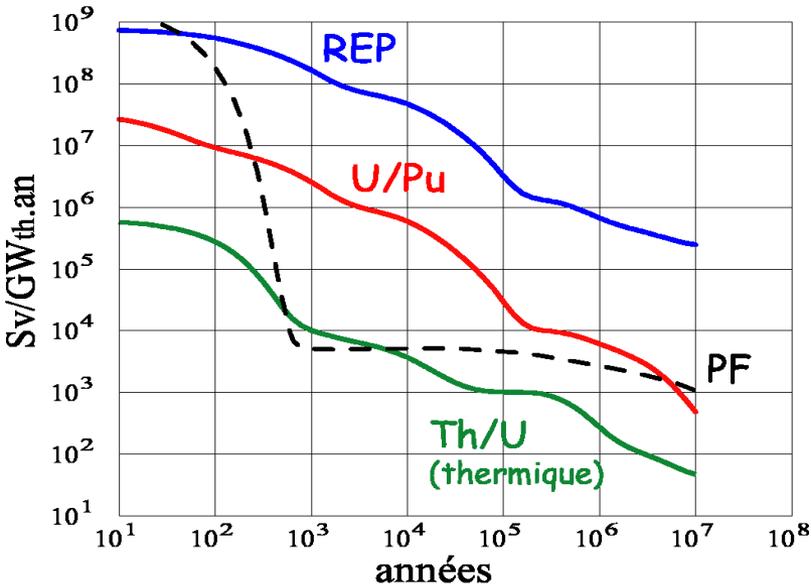
<- Th/U séparation poussée

RNR Na U/Pu vs Th/U



Transmutation en RNR

radiotoxicité $R(t)$ des rejets d'actinides à l'équilibre

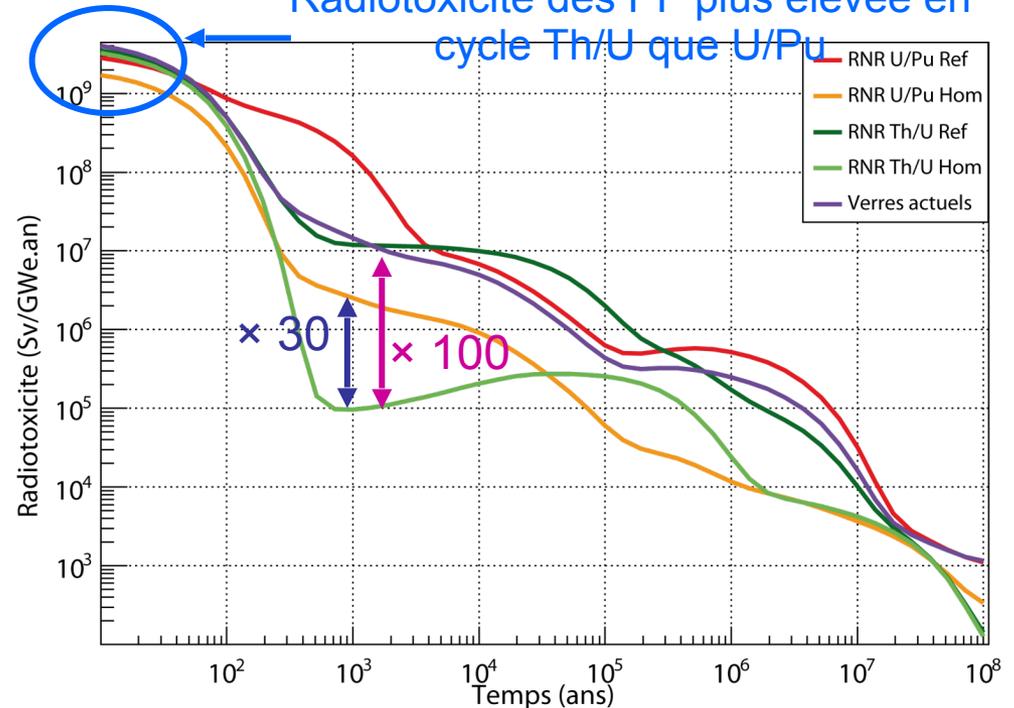


<- REP cycle ouvert

<- RNR U/Pu

<- Th/U séparation poussée

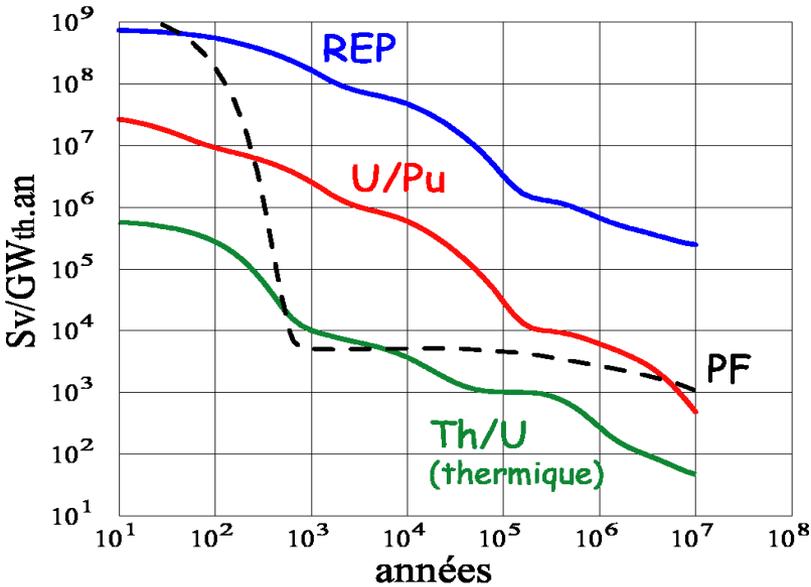
Radiotoxicité des PF plus élevée en cycle Th/U que U/Pu



RNR Na U/Pu vs Th/U

Transmutation en RNR

radiotoxicité $R(t)$ des rejets d'actinides à l'équilibre

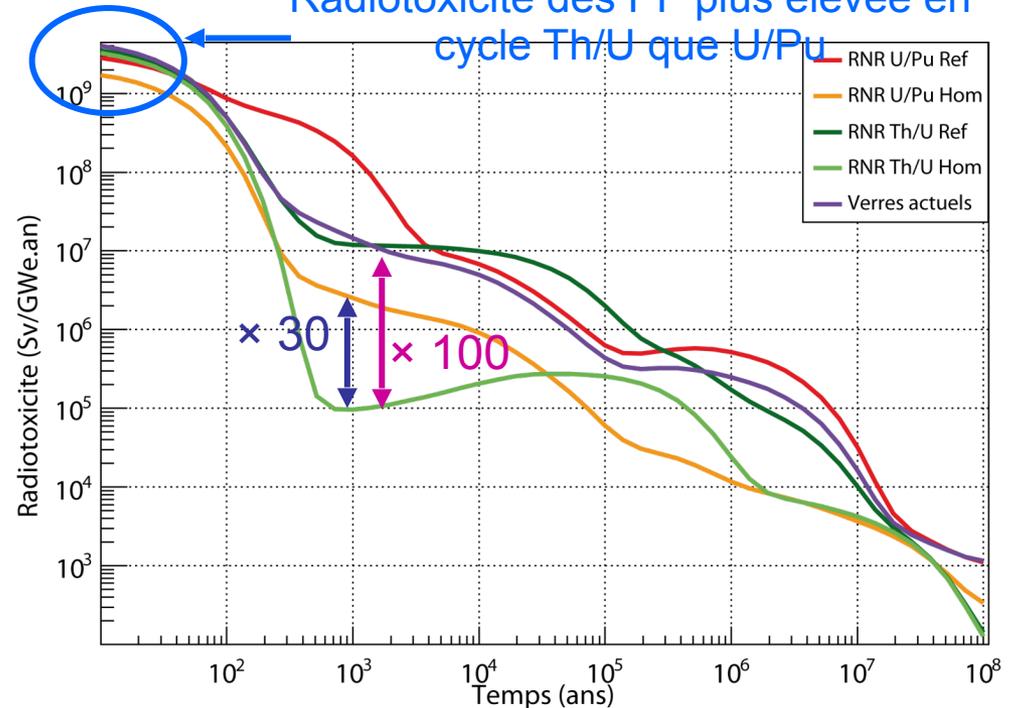


<- REP cycle ouvert

<- RNR U/Pu

<- Th/U séparation poussée

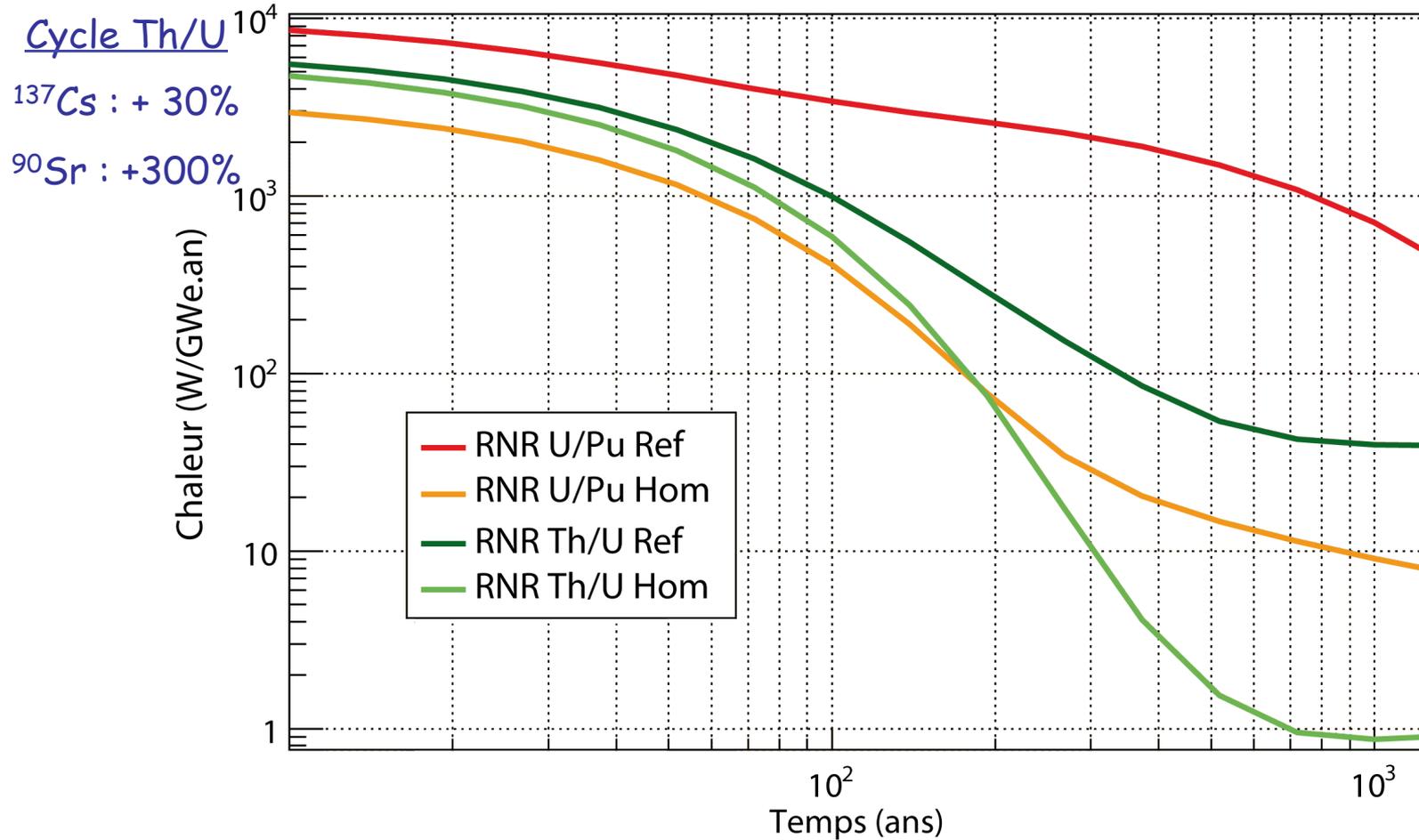
Radiotoxicité des PF plus élevée en cycle Th/U que U/Pu



RNR Na U/Pu vs Th/U
Hypothèse pertes au
retraitement
prépondérante

Transmutation : Chaleur

Chaleur des déchets après refroidissement



Cycle du Thorium

Amont

Si tension Unat

Régénération

=> recyclage du Th

Besoin = 1t/an/GWe

Cycle du Thorium

Amont

Si tension Unat

Régénération

=> recyclage du Th

Besoin = 1t/an/GWe

Sinon=> pas de régénération

Sortie du nucléaire + gestion Pu

=> besoin limité en temps

Economie Fissile en RThermique

=> recyclage du Th = besoin limité

Cycle du Thorium

Amont

Si tension Unat

Régénération

=> recyclage du Th

Besoin = 1t/an/GWe => recyclage du Th = besoin limité

Réserve des fertiles pas un enjeu (comme en U/Pu)

-> La France possède 9kT Th, 300kt d'Uappauvri

ENJEU = Gestion fissileS (comme en U/Pu)

Sinon=> pas de régénération

Sortie du nucléaire + gestion Pu

=> besoin limité en temps

Economie Fissile en RThermique

Cycle du Thorium

Amont

Si tension Unat

Régénération

=> recyclage du Th

Besoin = 1t/an/GWe => recyclage du Th = besoin limité

Réserve des fertiles pas un enjeu (comme en U/Pu)

-> La France possède 9kT Th, 300kt d'Uappauvri

ENJEU = Gestion fissileS (comme en U/Pu)

Sinon=> pas de régénération

Sortie du nucléaire + gestion Pu

=> besoin limité en temps

Economie Fissile en RThermique

Retraitement, Refabrication

Cycle du Thorium

Amont

Si tension Unat

Régénération

=> recyclage du Th

Besoin = 1t/an/GWe => recyclage du Th = besoin limité

Réserve des fertiles pas un enjeu (comme en U/Pu)

-> La France possède 9kT Th, 300kt d'Uappauvri

ENJEU = Gestion fissileS (comme en U/Pu)

Sinon=> pas de régénération

Sortie du nucléaire + gestion Pu

=> besoin limité en temps

Economie Fissile en RThermique

Retraitement, Refabrication

- Historiquement utilisation de procédé « THOREX » ,chimie aqueuse. Plus difficile que l'équivalente « PURE »

Cycle du Thorium

Amont

Si tension Unat

Régénération

=> recyclage du Th

Besoin = 1t/an/GWe => recyclage du Th = besoin limité

Réserve des fertiles pas un enjeu (comme en U/Pu)

-> La France possède 9kT Th, 300kt d'Uappauvri

ENJEU = Gestion fissileS (comme en U/Pu)

Sinon=> pas de régénération

Sortie du nucléaire + gestion Pu

=> besoin limité en temps

Economie Fissile en RThermique

Retraitement, Refabrication

- Historiquement utilisation de procédé « **THOREX** » ,chimie aqueuse. Plus difficile que l'équivalente « PURE »
- Manipulation (fabrication) difficile à cause de la **dose gamma** induite par des descendants de **U^{232}**

Cycle du Thorium

Amont

Si tension Unat

Régénération

=> recyclage du Th

Besoin = 1t/an/GWe => recyclage du Th = besoin limité

Réserve des fertiles pas un enjeu (comme en U/Pu)

-> La France possède 9kT Th, 300kt d'Uappauvri

ENJEU = Gestion fissileS (comme en U/Pu)

Sinon=> pas de régénération

Sortie du nucléaire + gestion Pu

=> besoin limité en temps

Economie Fissile en RThermique

Retraitement, Refabrication

- Historiquement utilisation de procédé « **THOREX** », chimie aqueuse. Plus difficile que l'équivalente « PURE »
- Manipulation (fabrication) difficile à cause de la **dose gamma** induite par des descendants de l'**U²³²**
- **Synergie avec les sels fondus** : retraitement par Pyrochimie + « fabrication = 0(0\$) »

Conclusion

Conclusion

Le cycle du thorium possède



Conclusion

Le cycle du thorium possède
le meilleur fissile : U233
la moins bonne place sur la
grille de départ



Conclusion

Le cycle du thorium possède
le meilleur fissile : U233
la moins bonne place sur la
grille de départ

Dans une course à étape, les
ressources de fertiles ne
sont pas un enjeu



Conclusion

Le cycle du thorium possède
le meilleur fissile : U233
la moins bonne place sur la
grille de départ

Dans une course à étape, les
ressources de fertiles ne
sont pas un enjeu

Nombreux scénarios
favorables



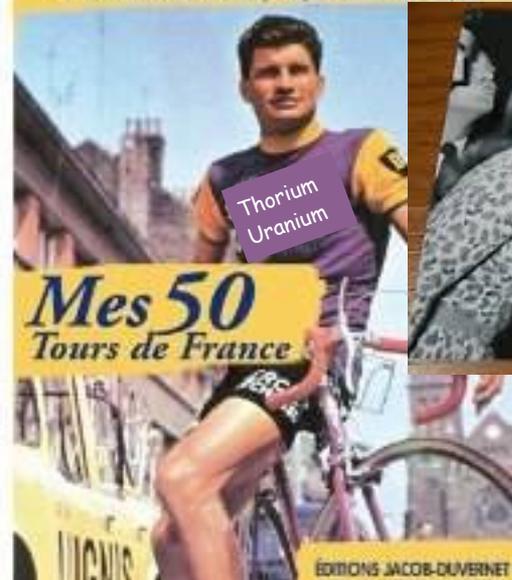
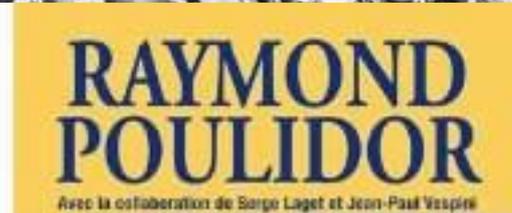
Conclusion

Le cycle du thorium possède
le meilleur fissile : U233
la moins bonne place sur la
grille de départ

Dans une course à étape, les
ressources de fertiles ne
sont pas un enjeu

Nombreux scénarios
favorables

Chouchou du public ?



Conclusion

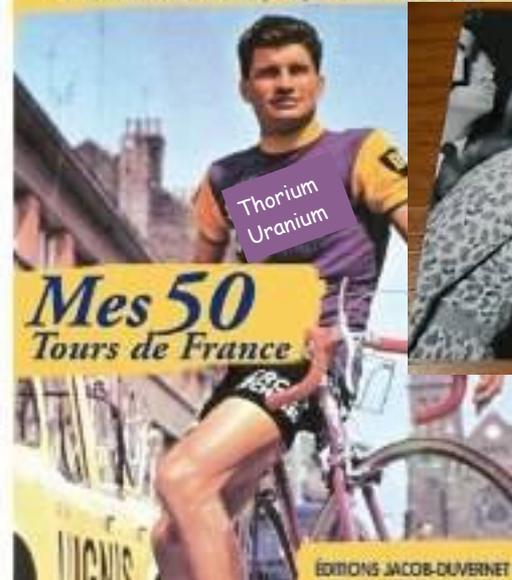
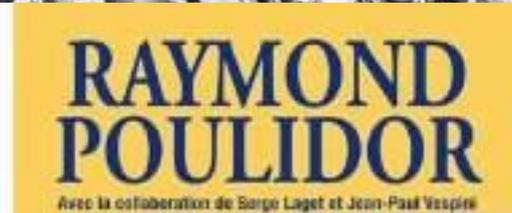
Le cycle du thorium possède
le meilleur fissile : U233
la moins bonne place sur la
grille de départ

Dans une course à étape, les
ressources de fertiles ne
sont pas un enjeu

Nombreux scénarios
favorables

Chouchou du public ?

Quand y aura il 2 places sur
le podium ?

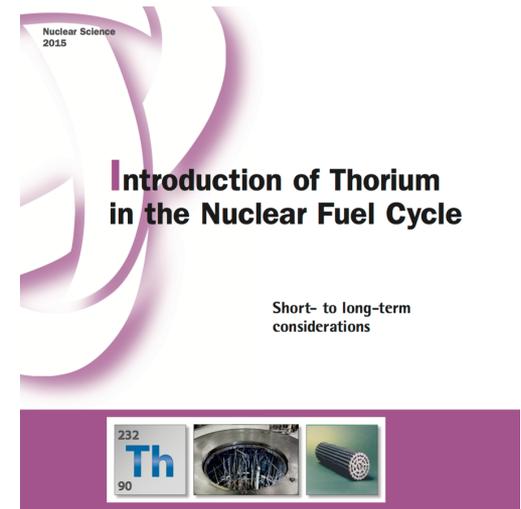


Références

NEA OECD « Introduction of Thorium In the Nuclear Fuel Cycle » 2015

D. Grenèche et al.

TEC DOC AIEA



Thèses Française (CNRS)

RNR (J. Brizi IPN Orsay)

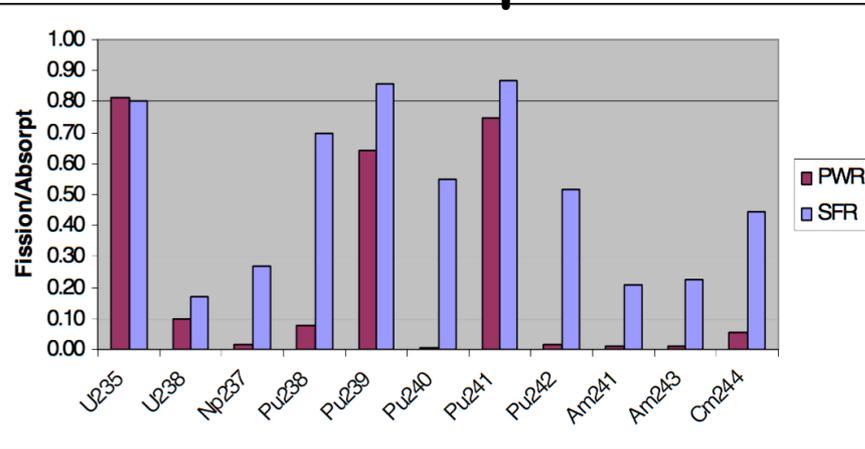
REP/CANDU (M. Ernoult , B. Leniau, P. Guillemain)

RSF (A. Nuttin, L. Matthieu, X. Doligez, M. Brovchenko, A. Laureau)



Les fissiles sont plus fissiles en RNR

Vu dans des présentations :



Contrairement aux REPs, les neutrons rapides favorisent la fission de tous les actinides :

- Moindre dégradation de l'isotopie et du potentiel de réactivité du Pu au cours de l'irradiation,
- Moindre production d'actinides supérieurs (facteur 5)

Les AM ($Z > 92$) disparaissent par capture \rightarrow décroissance \rightarrow fission souvent de l'U238 comme en ADS.

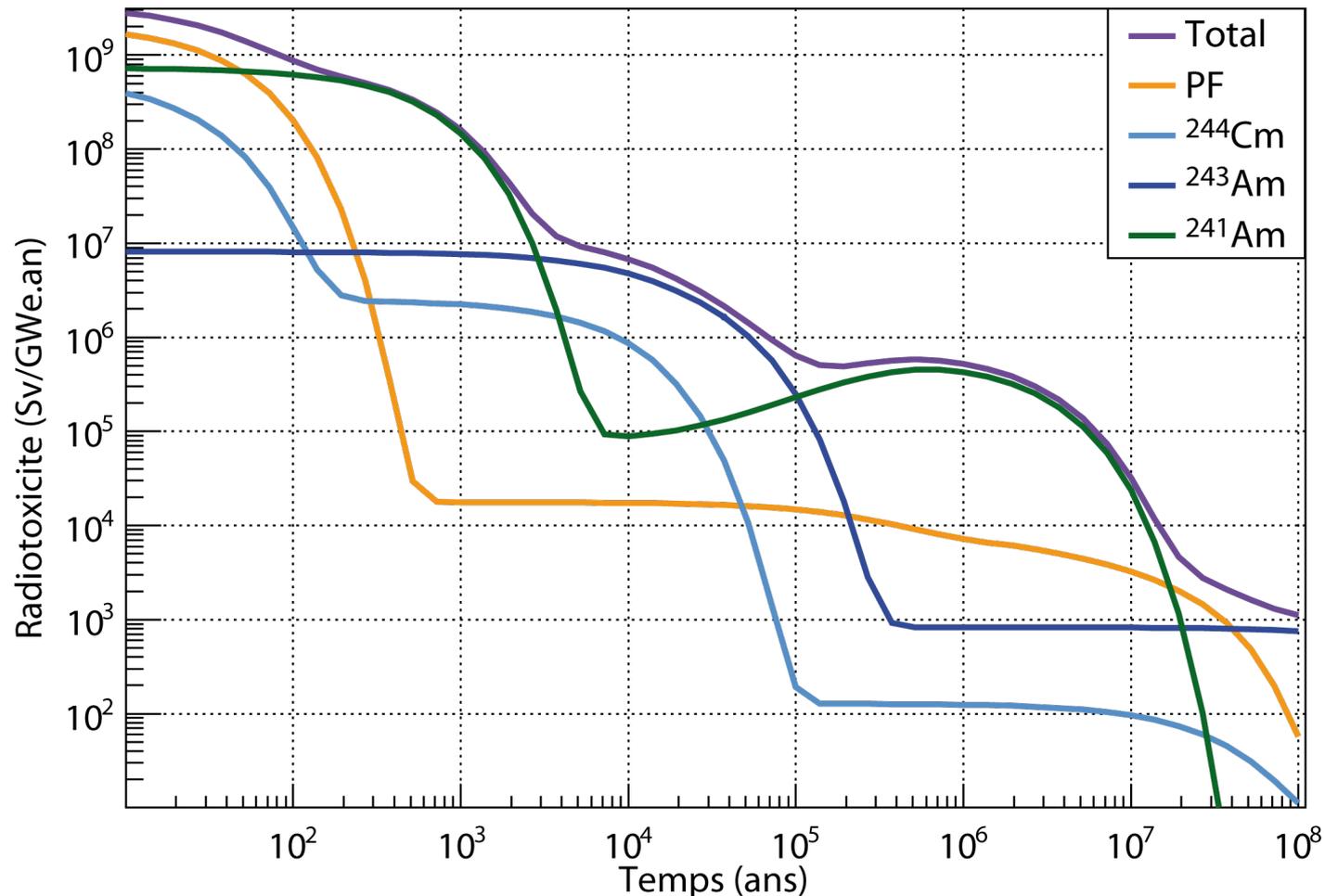
L'U238, fertile PRINCIPAL reste fertile...

Les fissiles (dont PU239, à peine moins de 50% des neutrons abordés !) diminuent par 2 leurs probabilités de capture !

LE FISSILE COMPTE !

Radiotoxicité des déchets en cycles U/Pu et Th/U

Déchets issus d'un RNR U/Pu Ref (après refroidissement)

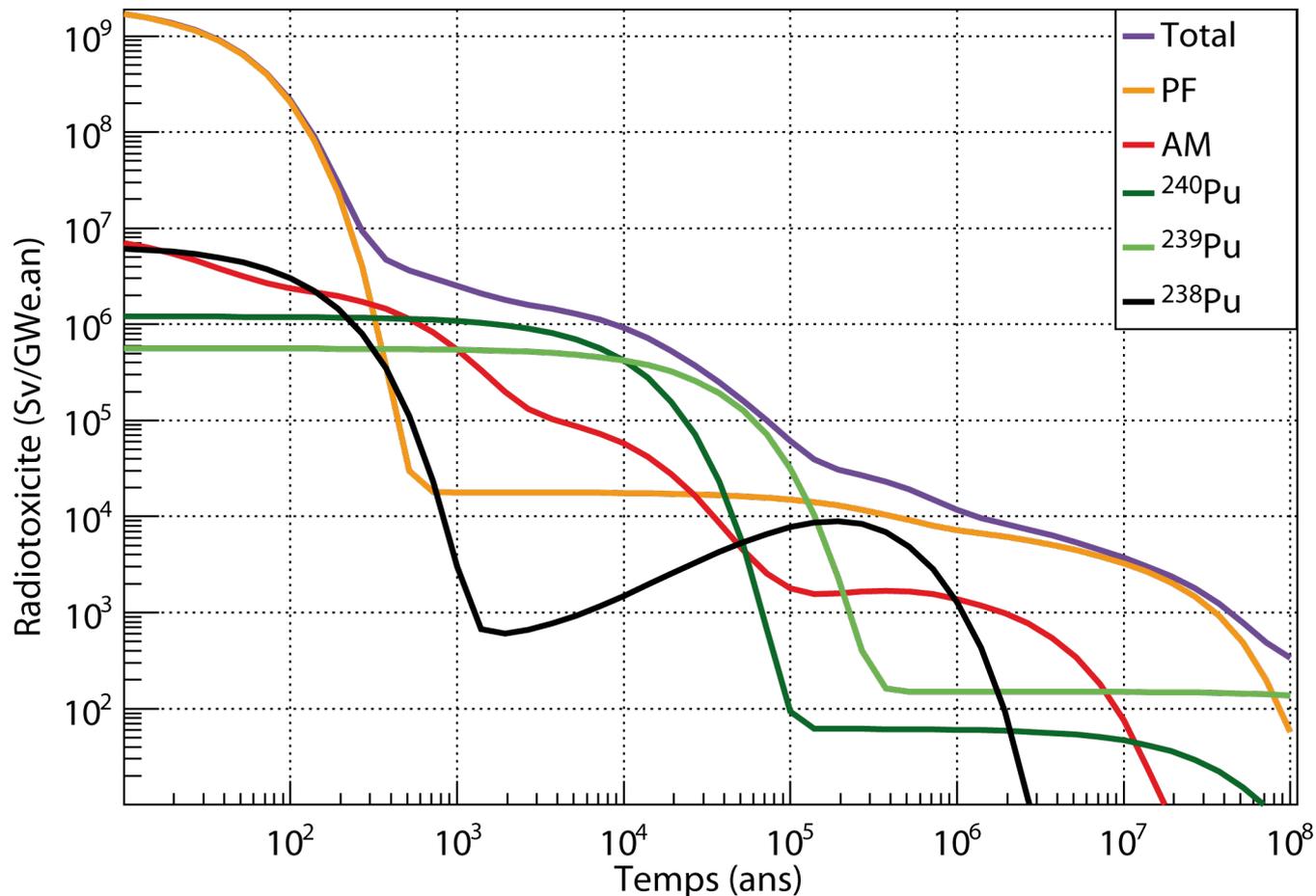


Principales contributions à la radiotoxicité des déchets pour un RNR U/Pu Ref

PF et AM dominant

Radiotoxicité des déchets en cycles U/Pu et Th/U

Déchets issus d'un RNR U/Pu Hom (après refroidissement)

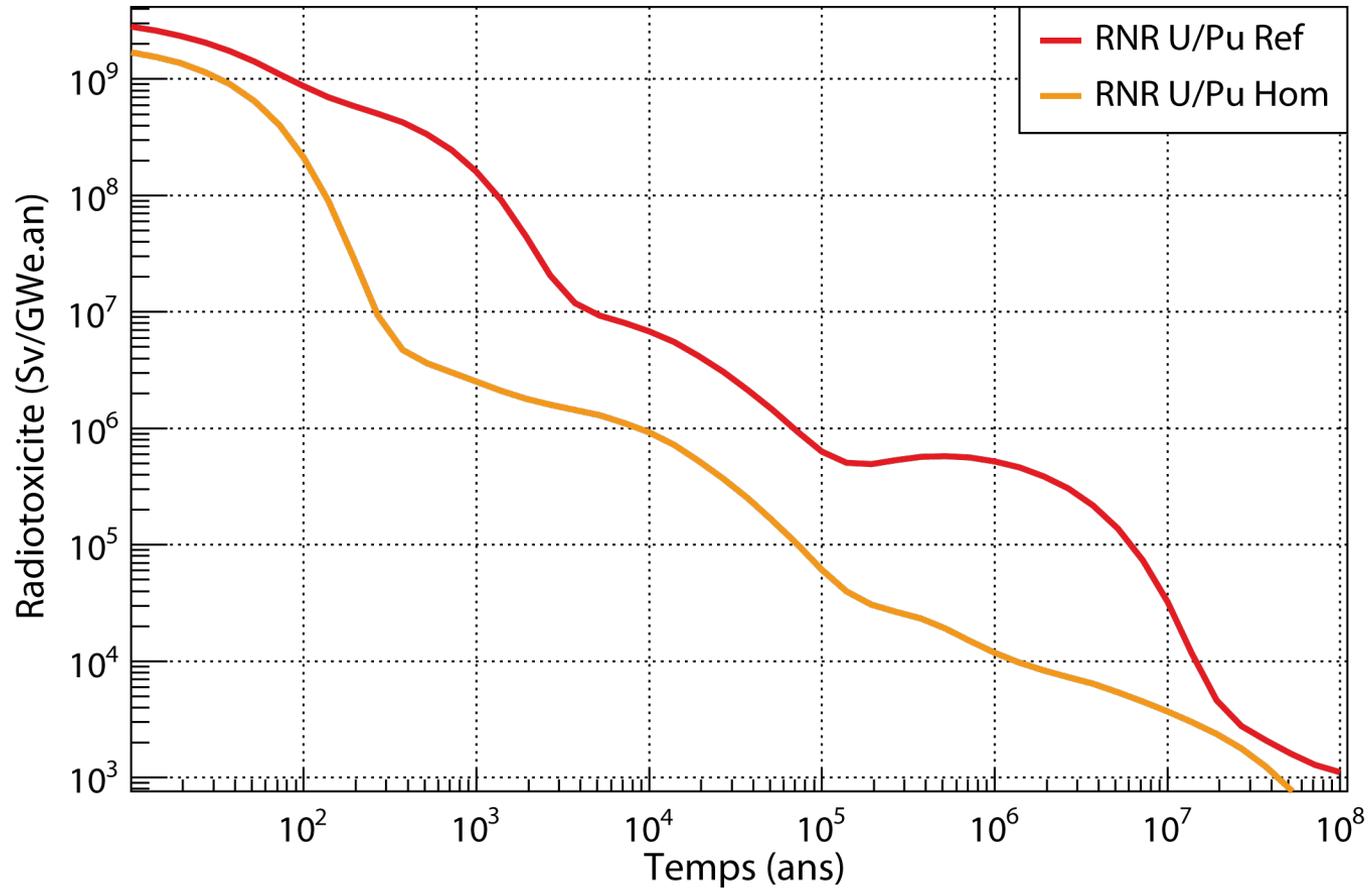


Principales contributions à la radiotoxicité des déchets pour un RNR U/Pu Hom

PF et pertes Pu dominant

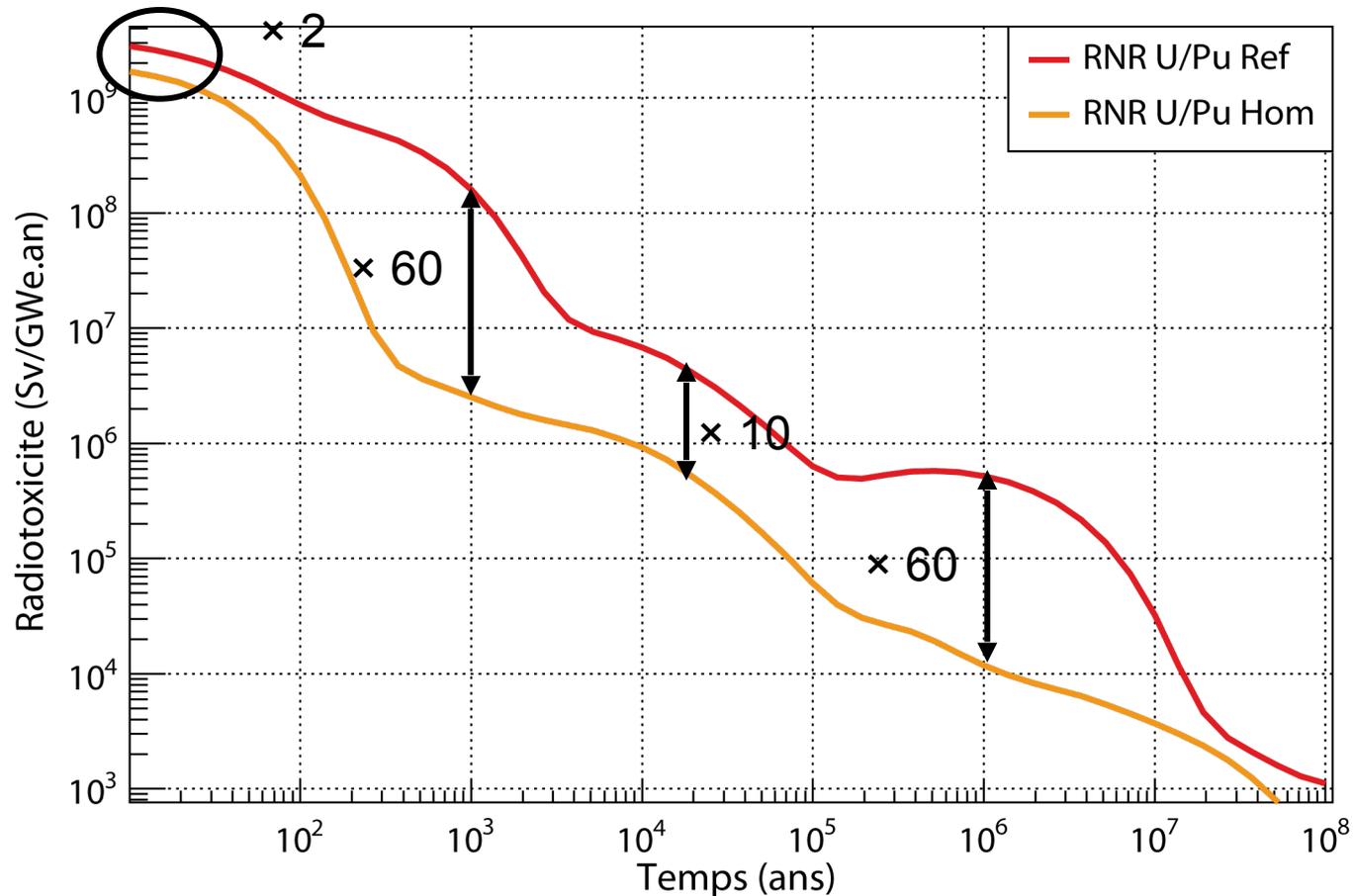
Radiotoxicité des déchets en cycles U/Pu et Th/U

Comparaison des déchets de RNR U/Pu Ref et de RNR U/Pu Hom



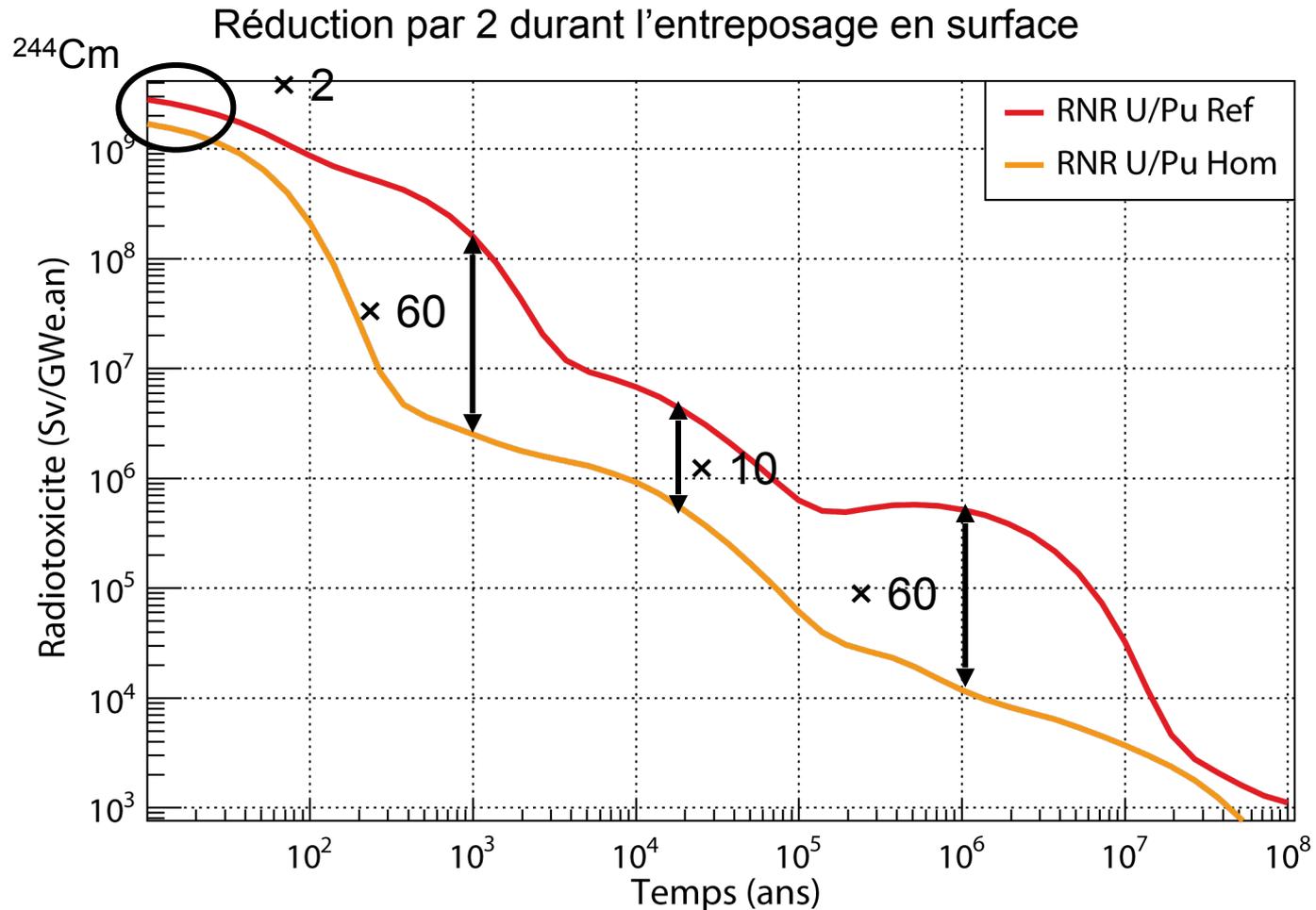
Radiotoxicité des déchets en cycles U/Pu et Th/U

Comparaison des déchets de RNR U/Pu Ref et de RNR U/Pu Hom



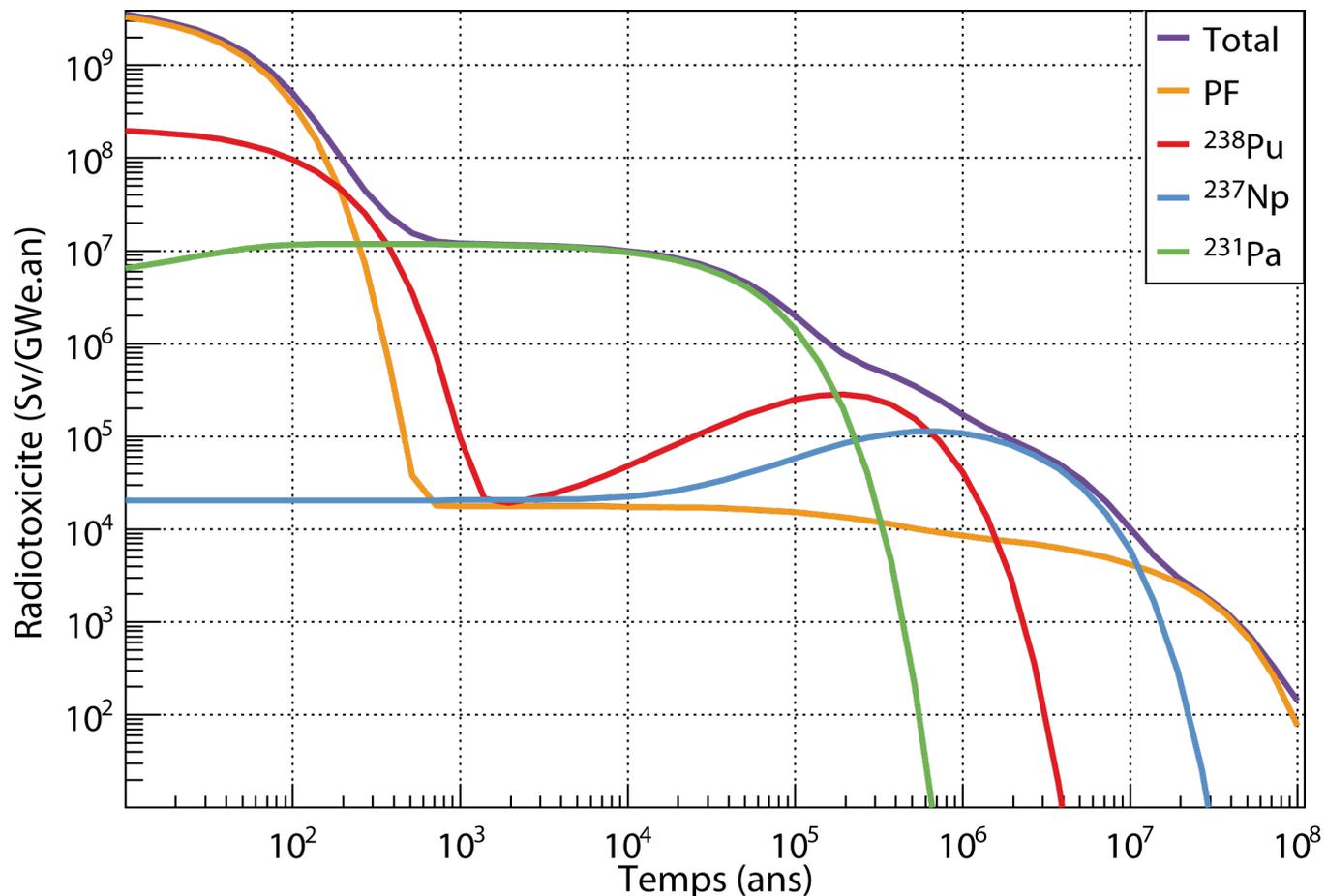
Radiotoxicité des déchets en cycles U/Pu et Th/U

Comparaison des déchets de RNR U/Pu Ref et de RNR U/Pu Hom



Radiotoxicité des déchets en cycles U/Pu et Th/U

Déchets issus d'un RNR Th/U Ref (après refroidissement)

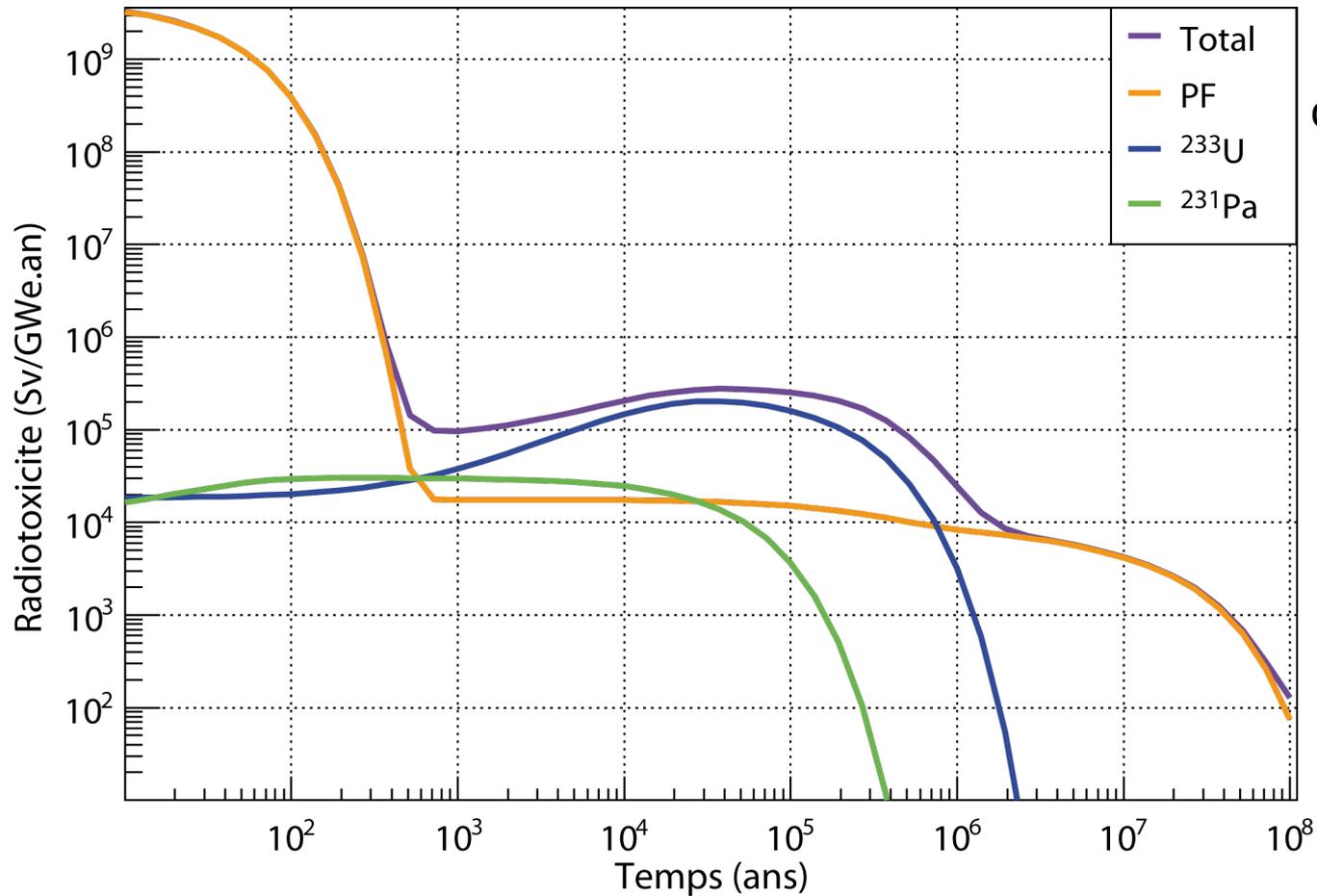


Principales contributions à la radiotoxicité des déchets pour un RNR Th/U Ref

PF et AM dominant

Radiotoxicité des déchets en cycles U/Pu et Th/U

Déchets issus d'un RNR Th/U Hom (après refroidissement)



Principales contributions à la radiotoxicité des déchets pour un RNR Th/U Hom

PF et pertes ^{233}U dominant