

LES DECHETS NUCLEAIRES

un (bref) panorama...

Bernard BOULLIS

LES DECHETS NUCLEAIRES

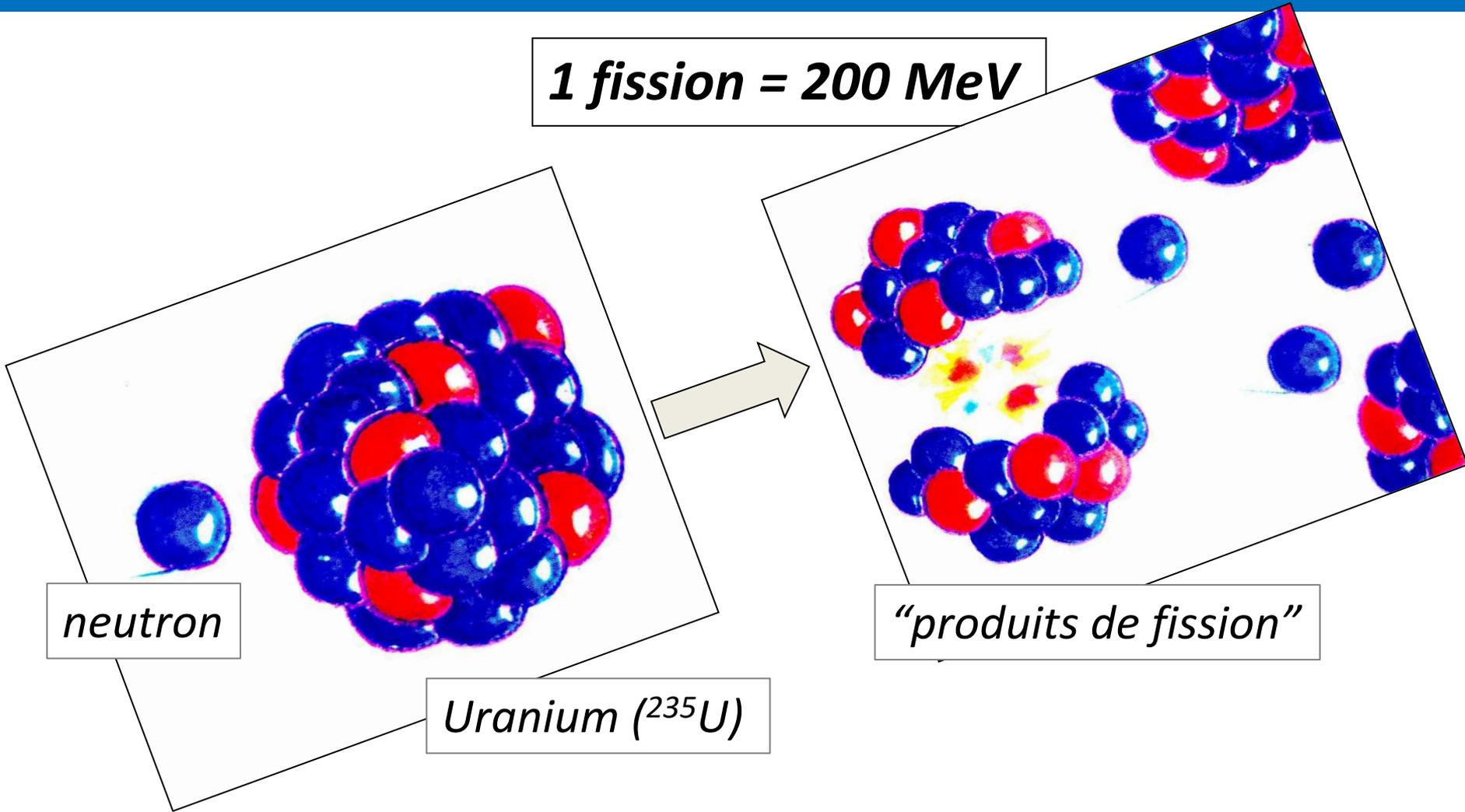
un (bref) panorama...

- **de quoi parle-t-on ?**
(origine, nature, quantités)
- **pourquoi sont-ils dangereux?**
(la radioactivité et ses effets)
- **comment les gère-t-on ?**
(en France et ailleurs)
- **quelles perspectives ?**
(les recherches en cours)

**1 – à l'origine des « déchets nucléaires »,
les réacteurs à fission**

LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES : *la fission*

1 fission = 200 MeV



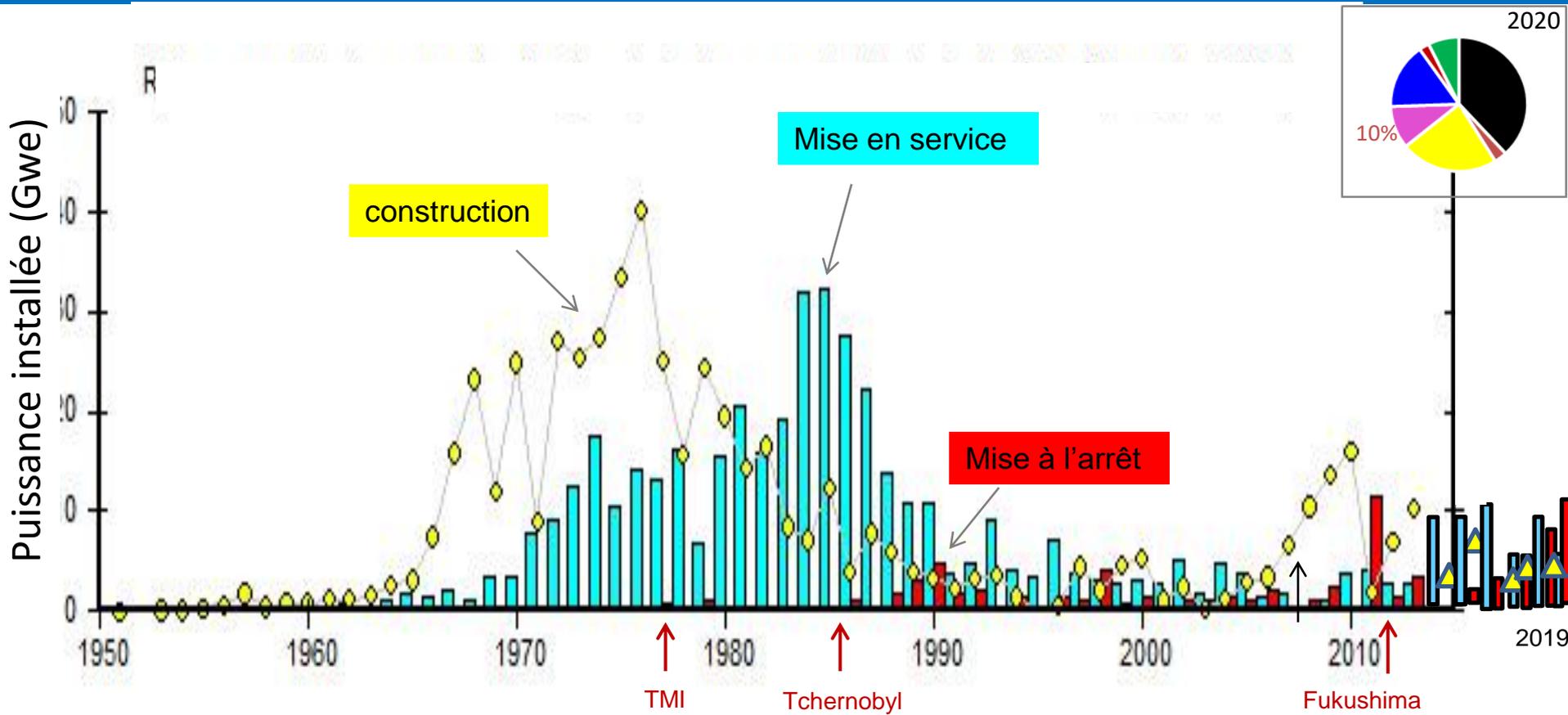
neutron

Uranium (^{235}U)

"produits de fission"

en France, chaque année, 50 tonnes (^{235}U) sont fissionnées

LES GENERATIONS DE REACTEURS...

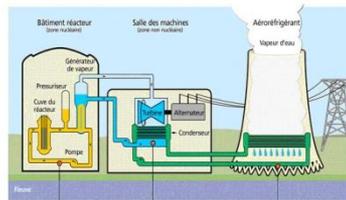


Generation I



(en démantèlement)

Generation II



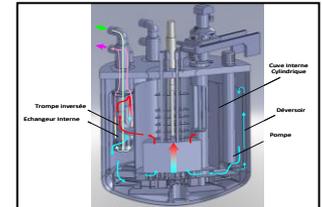
(en opération)

Generation III



(en construction)

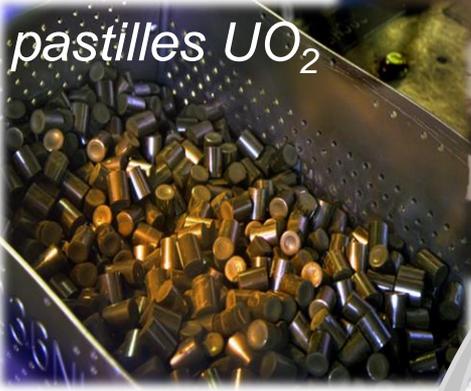
Generation IV



(à l'étude)

crayon assemblage

pastilles UO_2



enrichissement

^{235}U : 4%

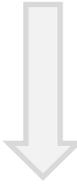


mine

^{235}U : 0.7%



AMONT



déchargement

AVAL



le terme « déchets nucléaires » recouvre en fait un ensemble très divers

- **Le déchet primaire**
(les radionucléides eux-mêmes) (~ 50 tonnes/an en France)
- **Les déchets secondaires**
*(les matériaux ayant été en contact avec les matières radioactives,
jusqu'aux enceintes des bâtiments lors de leur déconstruction)
(~ 30 000 tonnes/an)*

- **déchets historiques vs. déchets actuels**

- **déchets vs. “matières” (valorisables)**

LES DECHETS EN FRANCE

(PRODUCTION ANNUELLE, ORDRES DE GRANDEUR)

(ADEME 2018) ↓

déchets de <i>construction</i>	> 100 Millions tonnes	(342)
déchets <i>ménagers</i> :	> 10 Millions tonnes	(39)
déchets industriels:	> 10 Millions tonnes	(63)
<i>déchets dangereux</i> :	>1 Million tonnes	(12)
<i>dont radioactifs</i> :	~ 30 000 tonnes	(0.03)



3 – les résidus de la fission sont radioactifs

Tableau périodique des éléments chimiques. Les éléments sont colorés selon leur statut :

- Produits de fission (bleu clair) : H, He, Li, Be, Na, Mg, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, Ln, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn.
- Produits d'activation (jaune) : C, N, O, F, Ne, B, Si, P, S, Cl, Ar.
- Actinides (rose) : An, U, Np, Pu, Am, Cm.
- Autres : La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Fr, Ra, Rf, Db, Sb, Bh, Hs, Mt, Ac, Th, Pa, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr.

Legend:

- ACTINIDES (rose)
- PRODUITS DE FISSION (bleu clair)
- PRODUITS D'ACTIVATION (jaune)

Le combustible utilisé:

95% Uranium résiduel

4% Produits de Fission

1% Transuraniens (Pu essentiellement)

LA RADIOACTIVITE DES DECHETS NUCLEAIRES

produits de fission:
 β^- , majoritairement *périodes courtes*

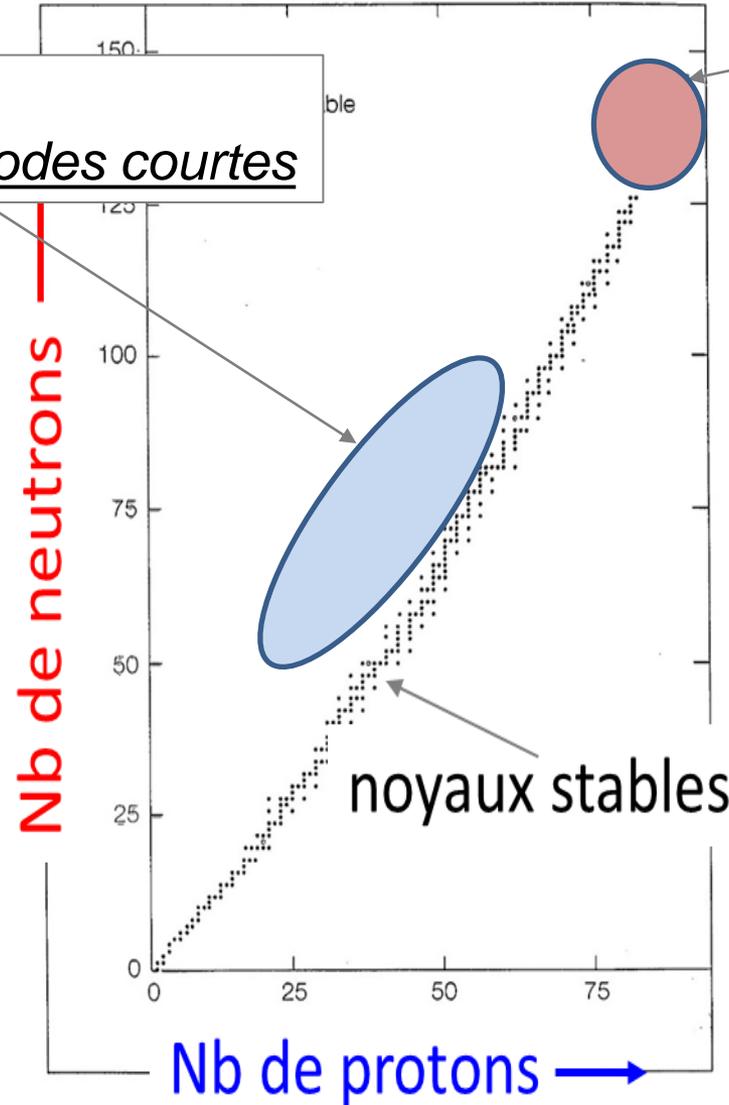
^{131}I : 8 jours

^{137}Cs : 31 ans

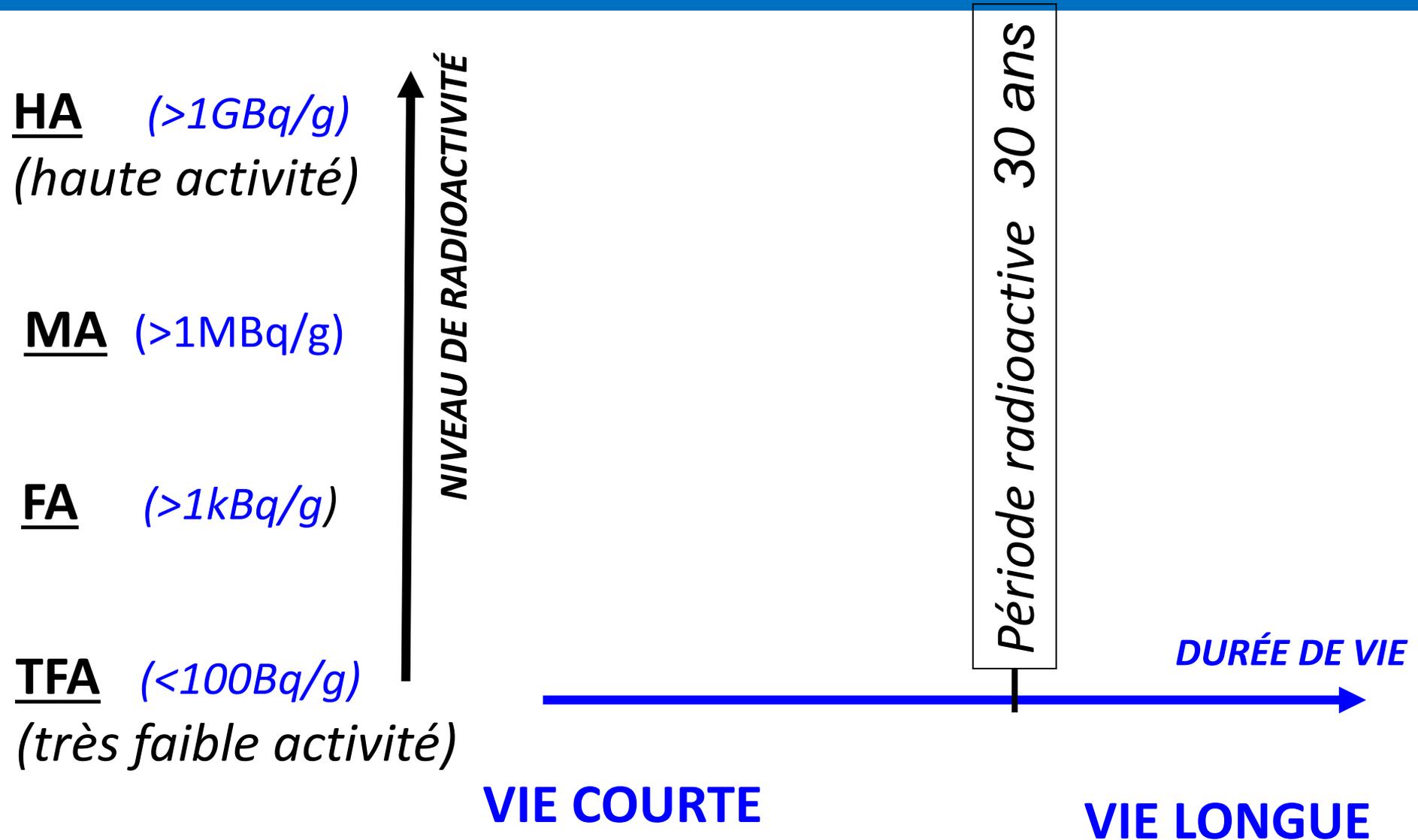
(^{99}Tc : 210 000 ans)

transuraniens:
 α , *périodes longues*

^{239}Pu : 24000 ans

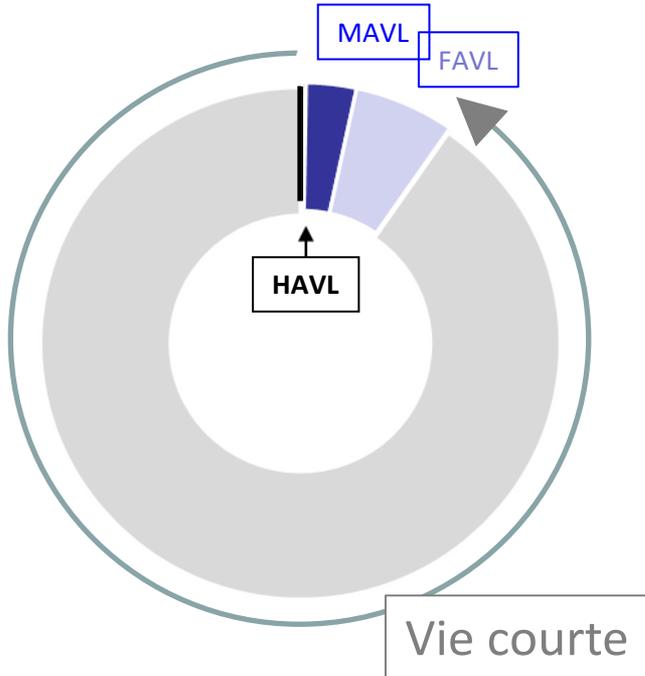


LES DECHETS NUCLEAIRES: ELEMENTS DE CLASSIFICATION



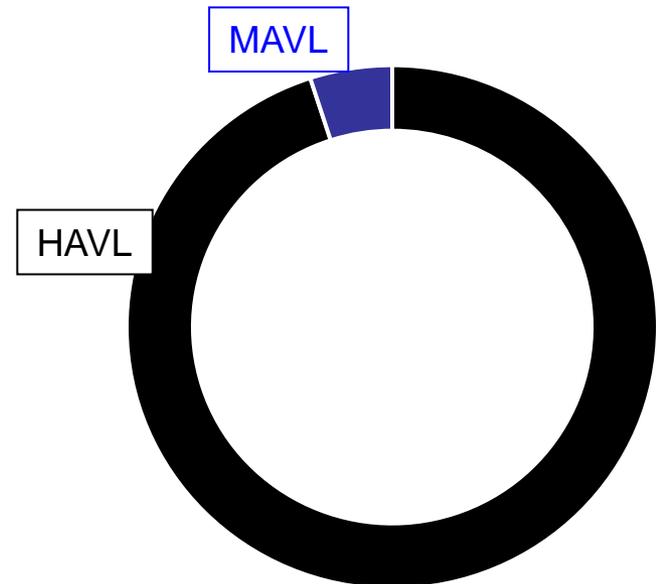
LES DECHETS RADIOACTIFS EN FRANCE: L'INVENTAIRE NATIONAL à fin 2020 (Andra, IN2022)

VOLUME TOTAL :
1.7 Millions m³



HAVL: 4000 m³ (+100 /an)
FAVC : 1 M m³
TFA : 0.5 M m³

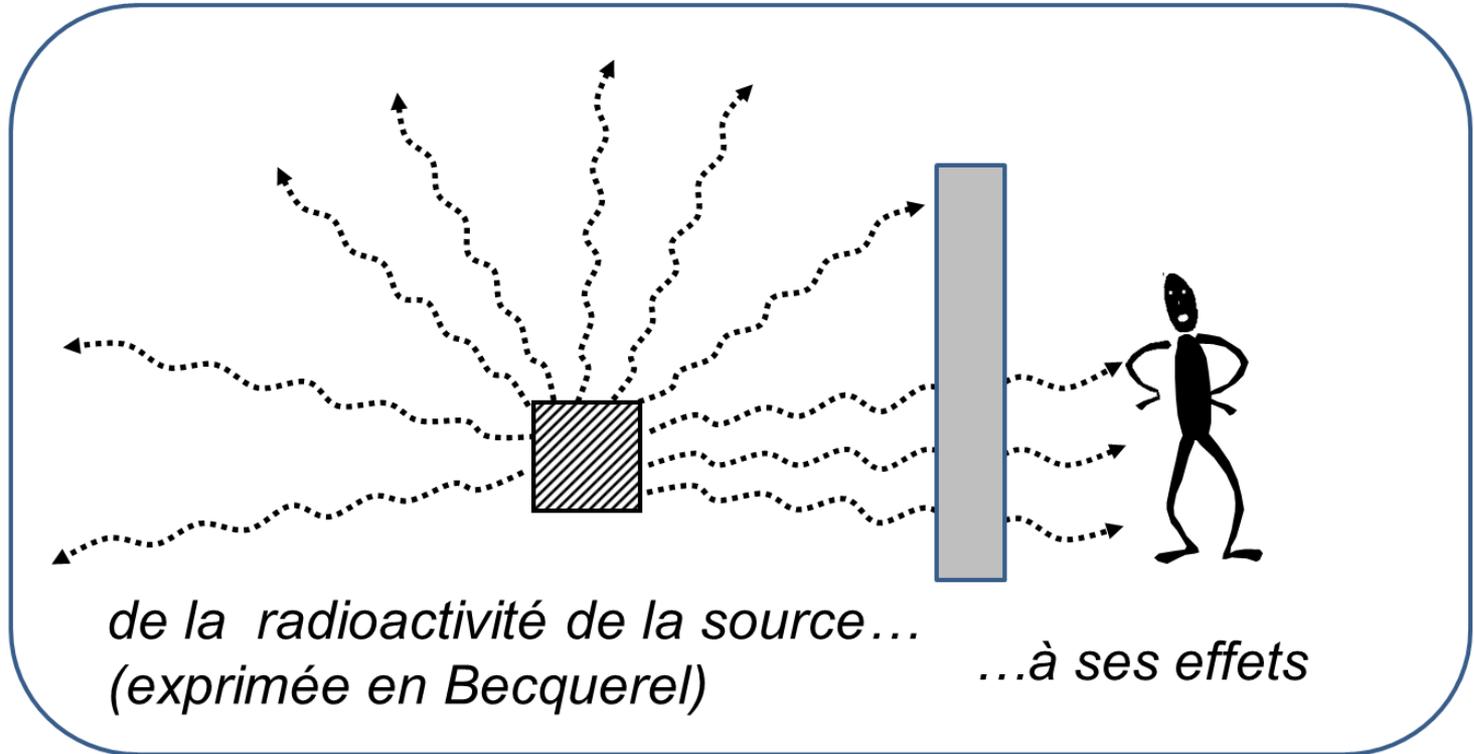
RADIOACTIVITE TOTALE:
200 millions de TBq



FA et TFA: < 0.05%

2 – la dangerosité des déchets nucléaires

La radioactivité, quels effets?



Les effets dependent de la “dose”

(la quantité d’énergie déposée ,exprimée en Gray)

(ou Sievert après “ponderation”)

1 Gy= 1J/kg

POURQUOI LA RADIOACTIVITE EST-ELLE DANGEREUSE ?

1 - EFFETS DETERMINISTES

pas d'effets

brûlures ...chute cheveux ...alteration sang...

0,5 Sv

10 Sv

*3/1000 Sv
(3 milliSv)*

*dose naturelle
annuelle moyenne*

- *effets précoces
et certains à dose donnée*
- *plus la dose est élevée,
plus les dommages sont graves
(jusqu'à un effet létal)*

2 - EFFETS STOCHASTIQUES

?

augmentation du risque de cancers et leucémies

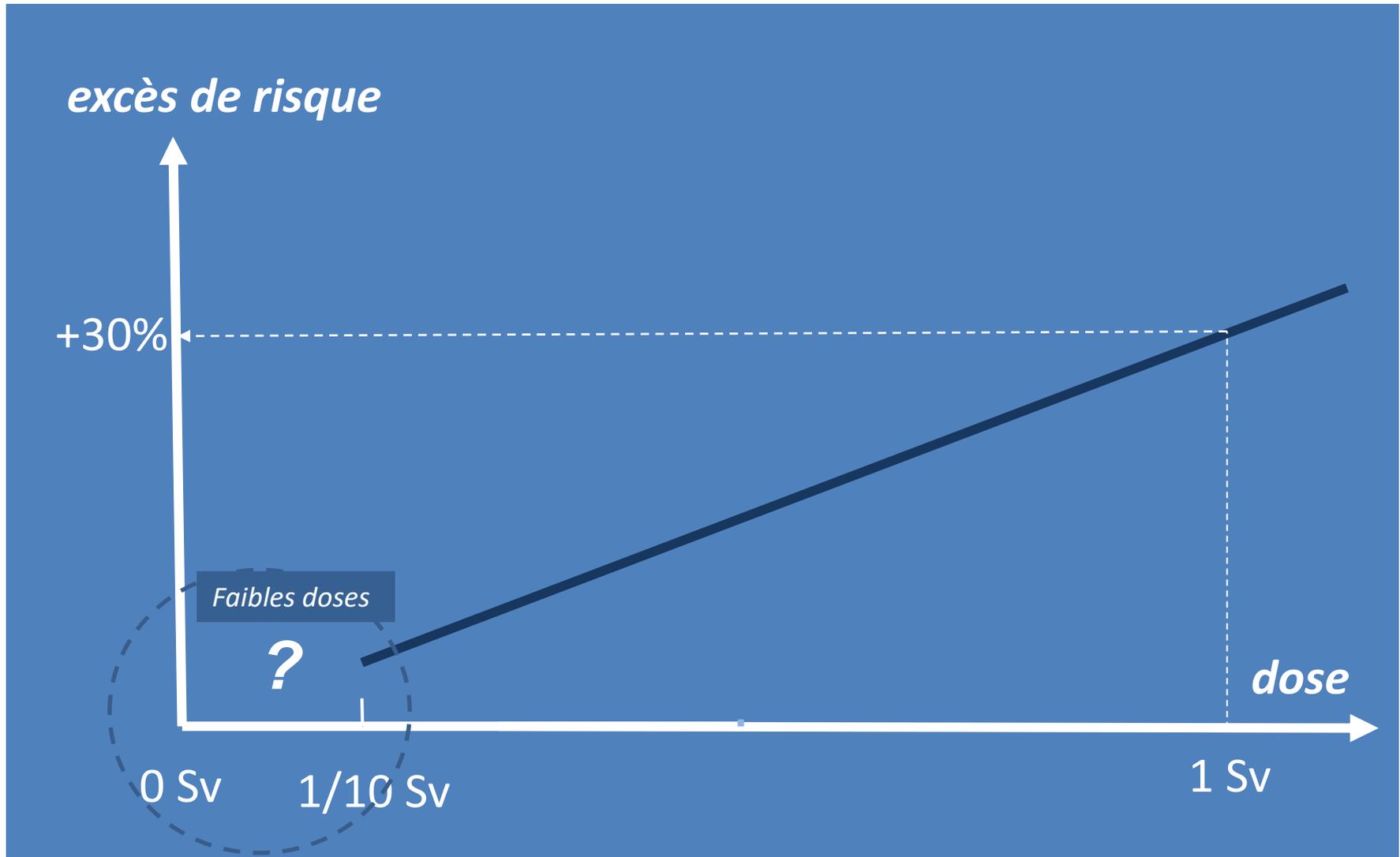
0,1 Sv

*3/1000 Sv
(3 milliSv)*

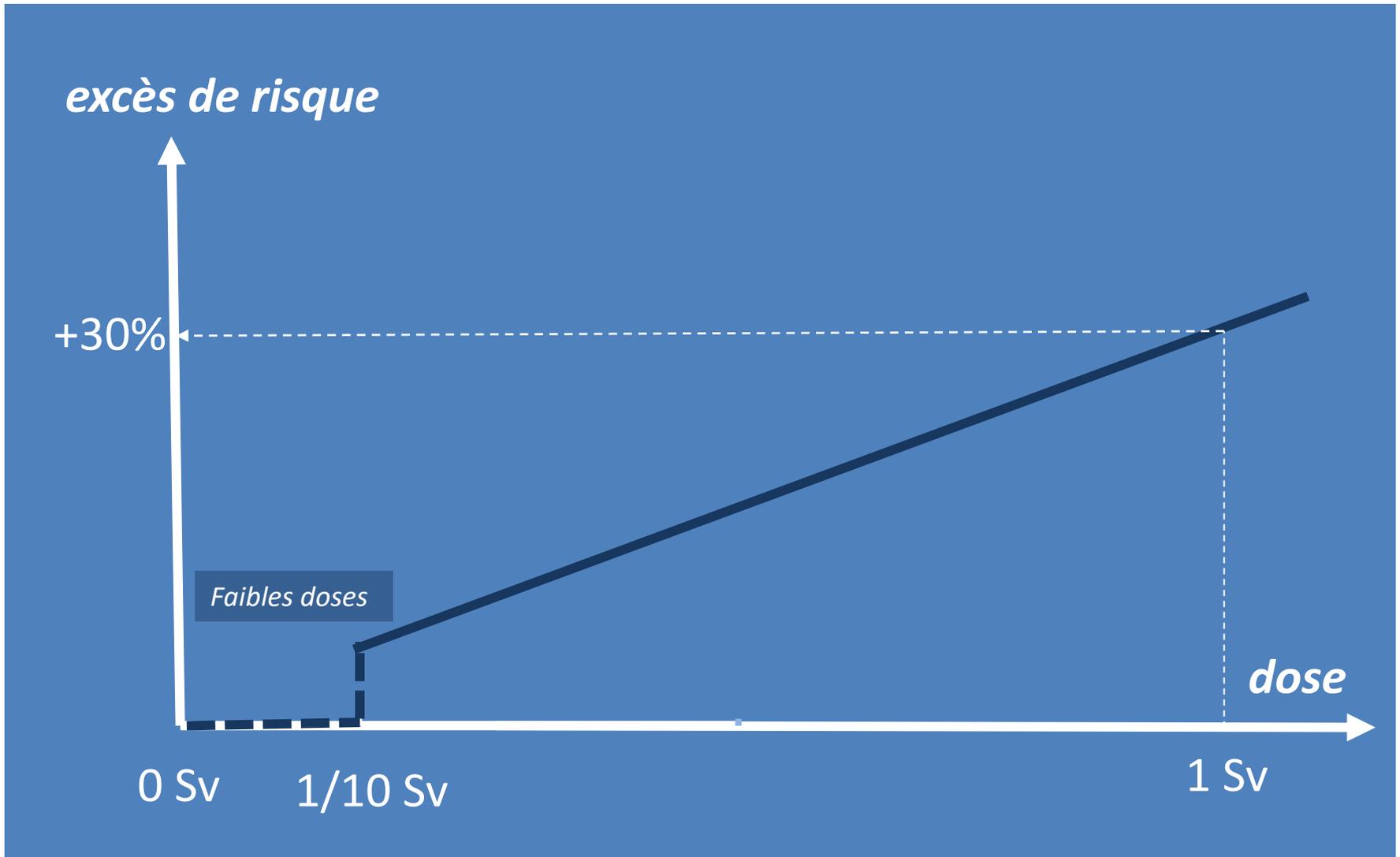
dose naturelle
annuelle moyenne

- effets différés et toujours incertains
- la gravité des effets ne dépend pas de la dose
- plus la dose est élevée, plus la probabilité d'occurrence est élevée

LA RELATION DOSE / EFFETS (*STOCHASTIQUES*)

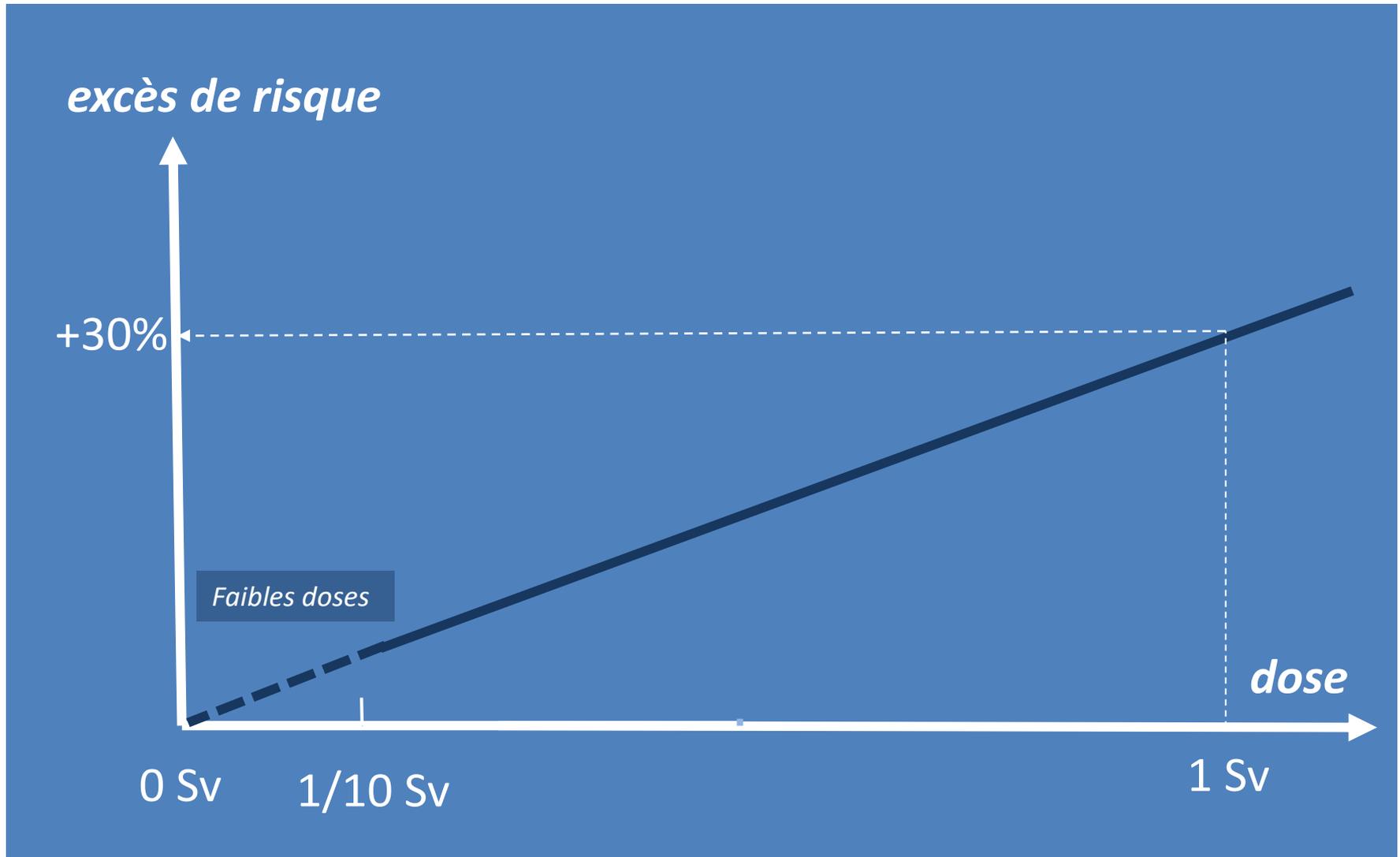


LA RELATION DOSE / EFFETS (*STOCHASTIQUES*)



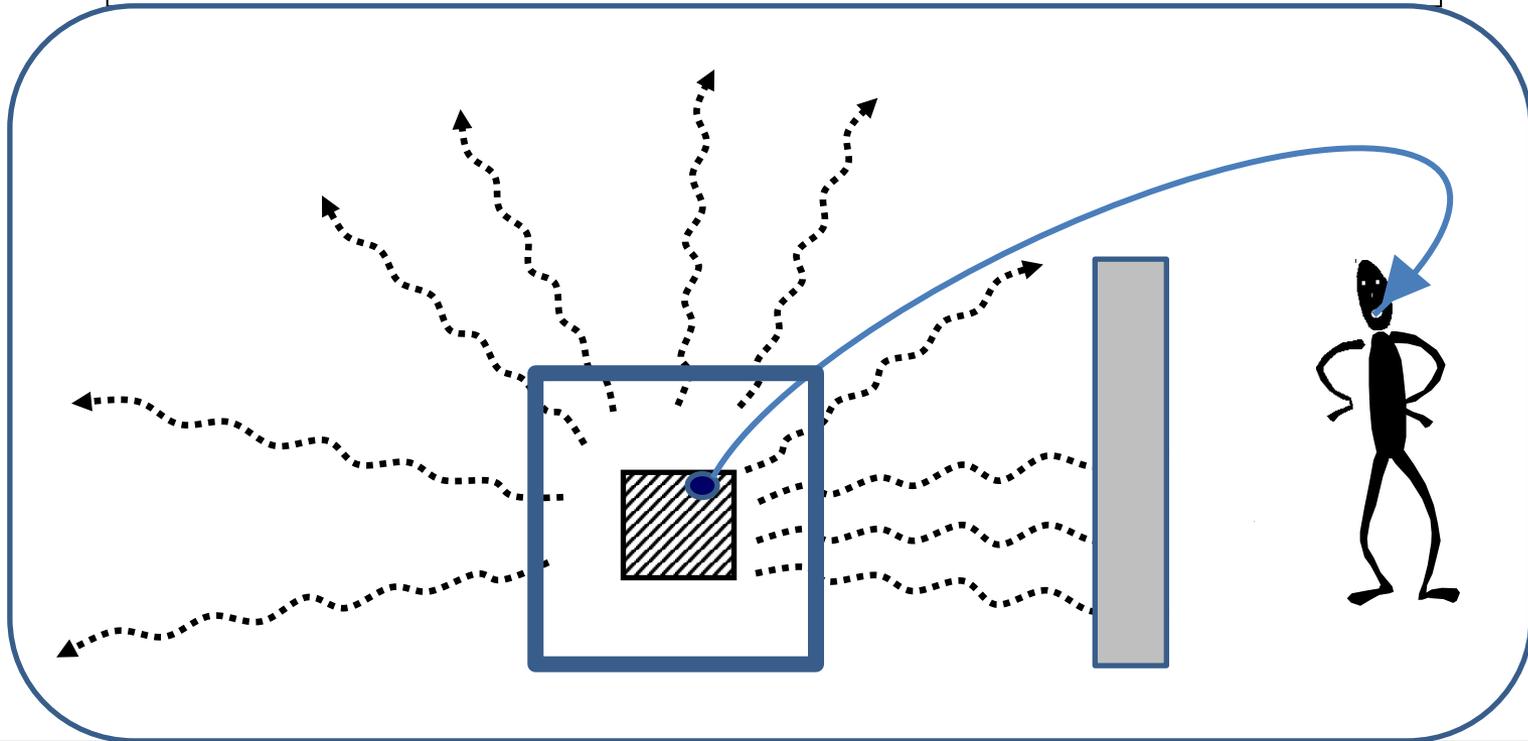
LA RELATION DOSE / EFFETS (STOCHASTIQUES)

“RELATION LINEAIRE SANS SEUIL”



RISQUES ET DISPOSITIFS DE PROTECTION

1 - RISQUE D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS (*BESOIN D'ECRANS DE PROTECTION*)



2 - RISQUE D'INCORPORATION DE LA SOURCE DE RAYONNEMENTS (*BESOIN DE CONFINEMENT*)

LA DANGÉROSITÉ AU COURS DU TEMPS

PF (produits de fission)

radioactifs $\beta\gamma$,

période moyenne < 30 années

TRU (*Pu et actinides mineurs*)

radioactifs α

longues chaînes de décroissance

périodes (très) longues

IRRADIATION EXTERNE

(débit de dose Sv/h)
(ordres de grandeur)

assemblage CU à 1m:

- 6 mois : 250 Sv/h
- 3 ans : 50 Sv/h
- 50 ans : 3 Sv/h
- 500 ans : 0,0001 Sv/h

INCORPORATION

(dose engagée Sv /assemblage)
(ordres de grandeur)

Ingestion assemblage CU:

- 3 ans : 10^9 Sv
- 1000 ans « : 10^8 Sv
- 10000 ans « : 10^7 Sv

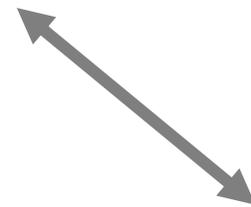
(données CEA)

***3 – comment gère-t-on
les déchets nucléaires?***

1-REDUIRE A LA SOURCE

2 -ATTENDRE

3 -CONFINER



1-REDUIRE A LA SOURCE
RECYCLAGE

2 –ATTENDRE
ENTREPOSAGE

3 –CONFINER
MATRICE
CONTENEUR
« SITE HOTE »

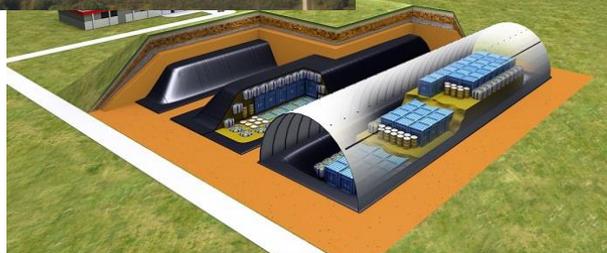


LES DECHETS A VIE COURTE (DECHETS SECONDAIRES D'EXPLOITATION)

TFA



Moronvilliers



FA-MA



Manche

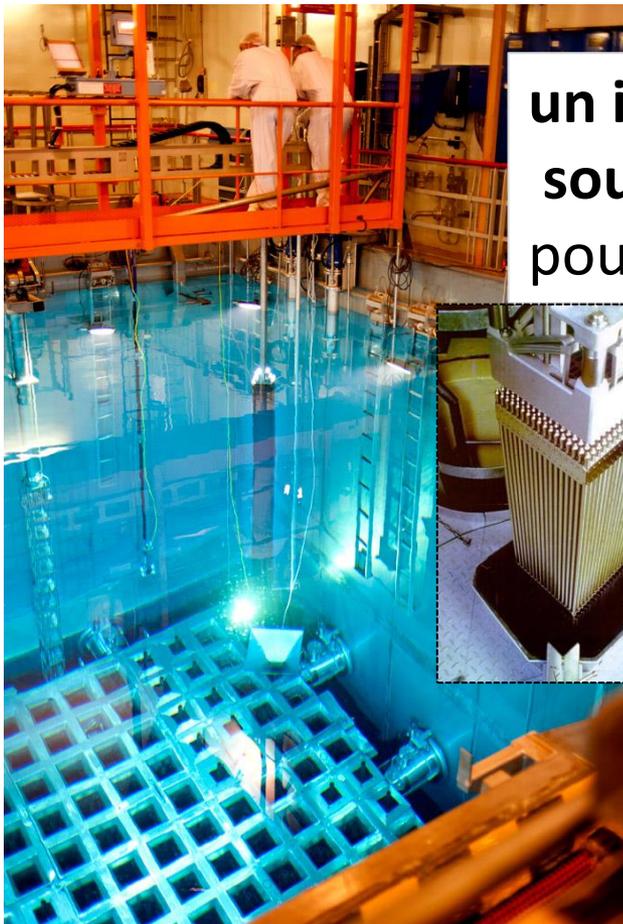


Aube



LES COMBUSTIBLES NUCLEAIRES « USÉS », TERME SOURCE DES DECHETS HAVL

quantités déchargées cumulées (*monde*) # >400 000 tonnes
(# < + 10 000 tonnes /an)



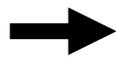
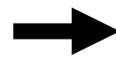
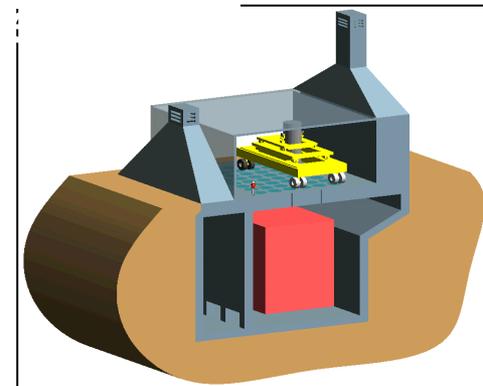
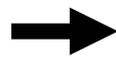
un impératif: quelques années d'entreposage
sous eau, sur site
pour décroissance (*radioactivité, chaleur*)



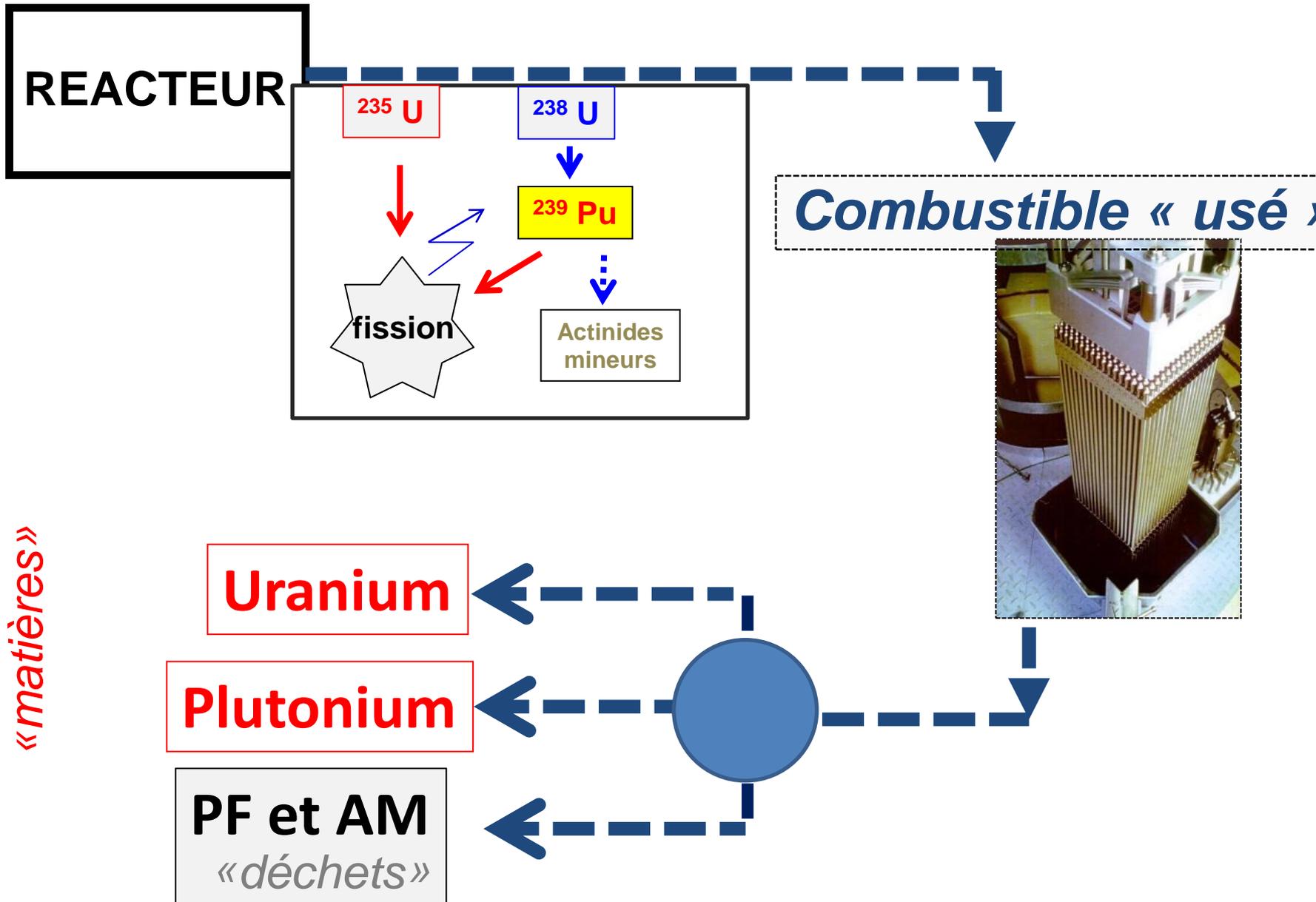
Après 6 mois, un assemblage (~500 kg)

- >10 kW
- > 100 000 TBq

LES COMBUSTIBLES NUCLEAIRES « USÉS » : *et après ?*



LA STRATEGIE FRANÇAISE : LE RECYCLAGE



LA STRATEGIE FRANÇAISE : LA VITRIFICATION DES PRODUITS DE FISSION

PRODUITS DE FISSION



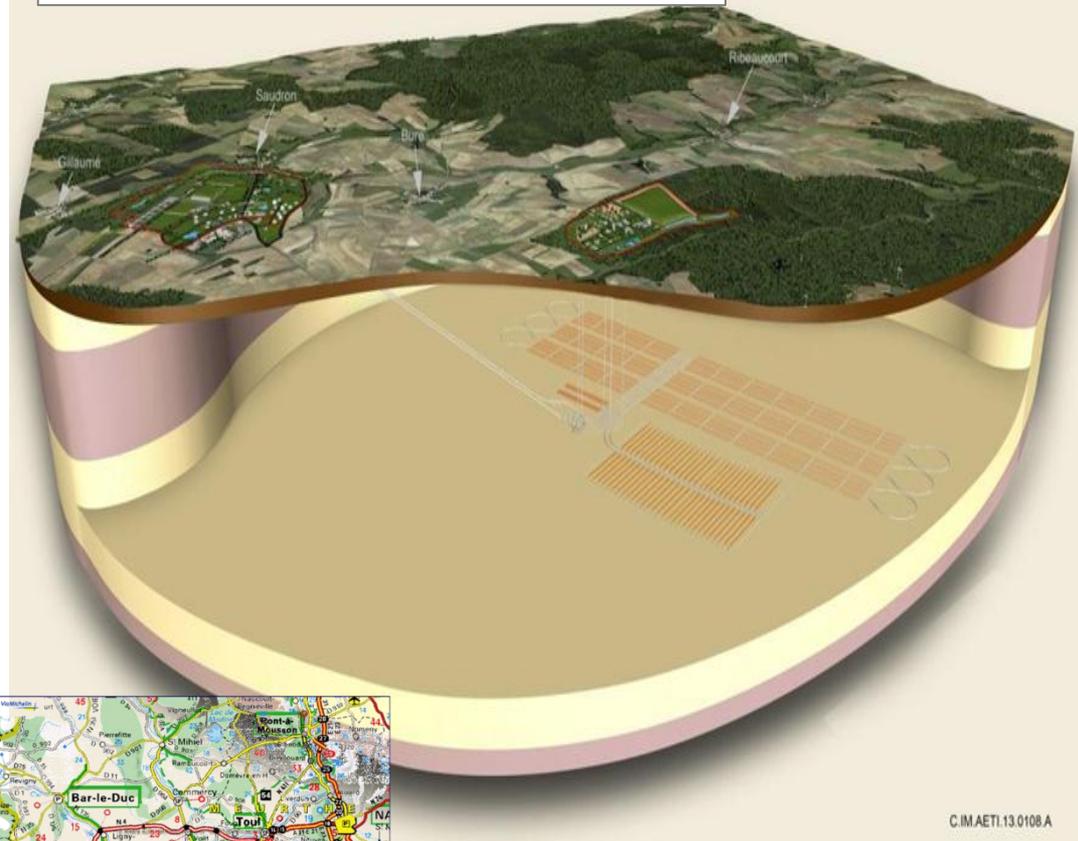
150 litres,
PF #15%, #2KW,
>15 millions milliards Bq



LE (PROJET DE) STOCKAGE GEOLOGIQUE DES CONTENEURS DE VERRE (France)

Projet CIGEO:

-500m ,dans une couche d'argile



Bure

plusieurs "barrieres":

- *le verre*
- *(le conteneur)*
- *l'argile*



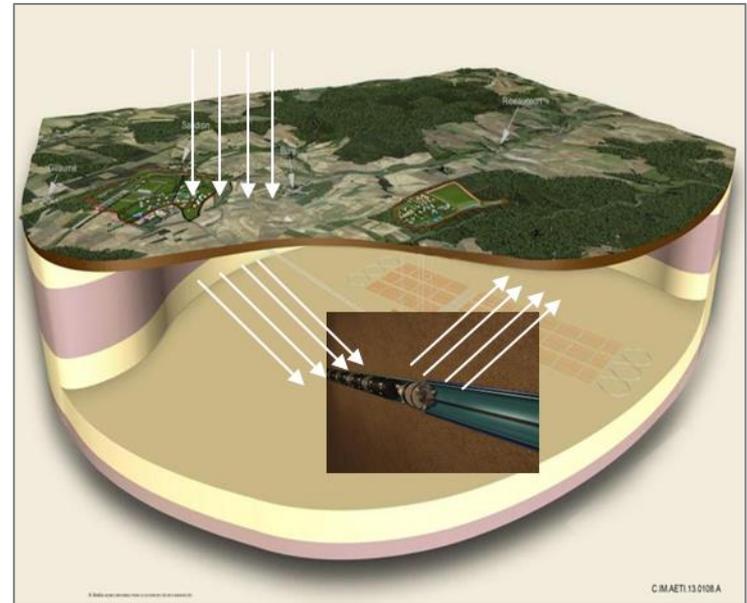
veole de stockage dans l'argile

LA SURETE A LONG TERME DU STOCKAGE GEOLOGIQUE (France)

l'eau, vecteur potentiel de radionucléides
(dissolution-transport)

Au sein de la couche d'argile:

- faible mobilité de l'eau
- absorption de certains PF
- très faible solubilité des TRU



C.MAETI.13.0108.A

Les estimations ANDRA de l'impact ("groupe critique")

- pas d'impact avant *plusieurs centaines de milliers d'années*
- puis environ *1/1000 radioactivité naturelle*

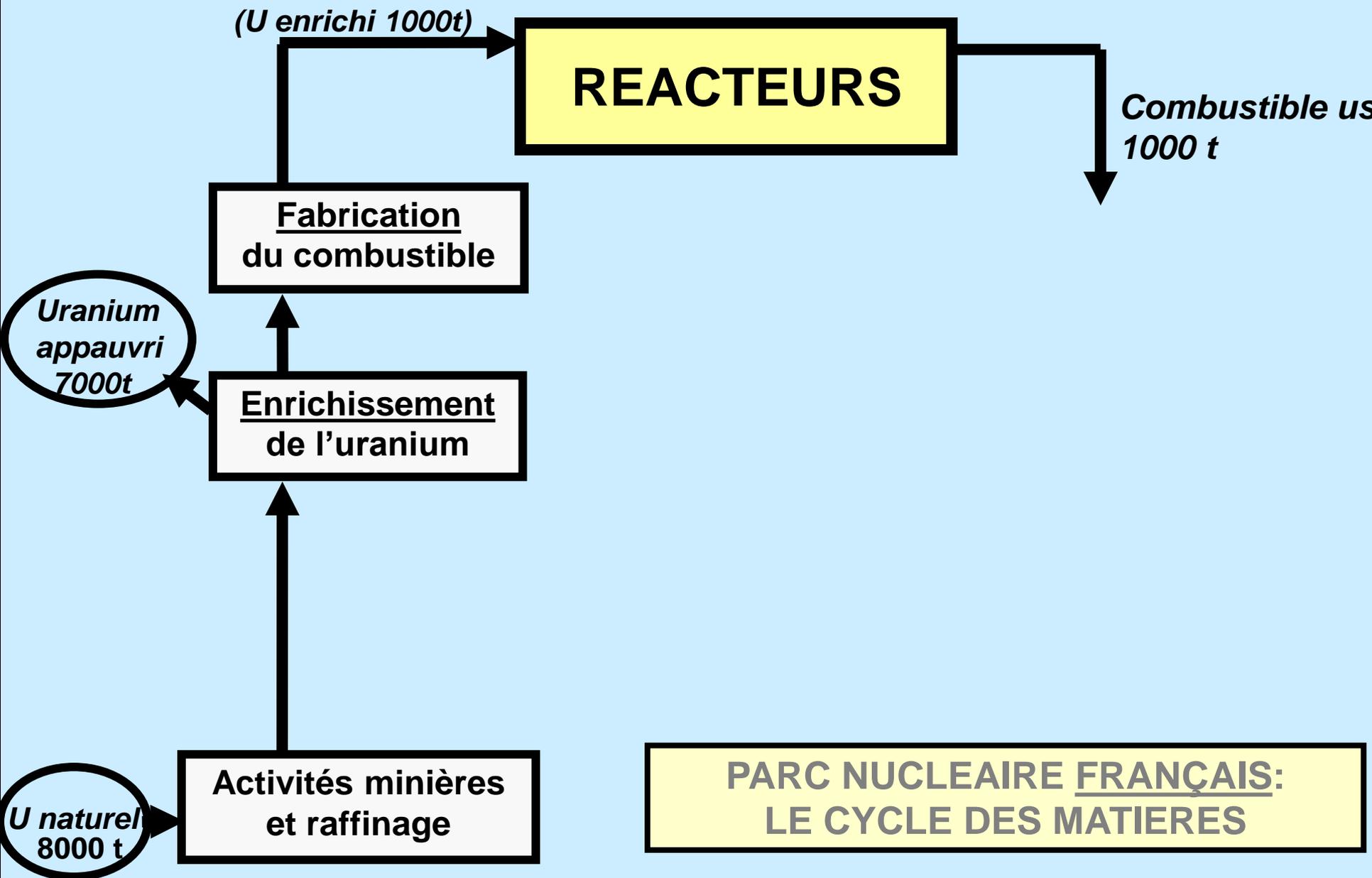
Les questions en suspens...

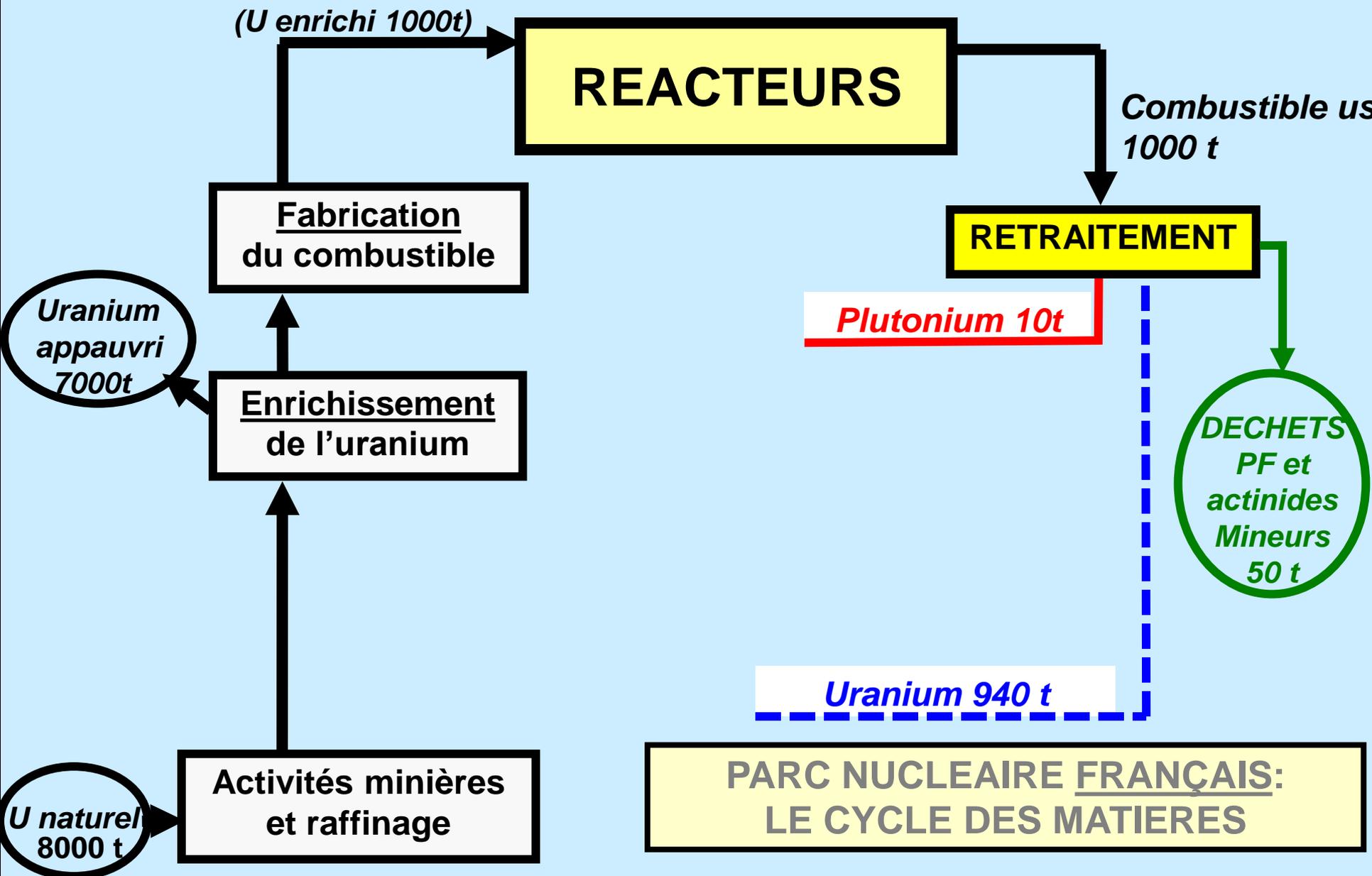
- *des déchets particuliers ...*
(déchets historiques, déchets de démantèlement)

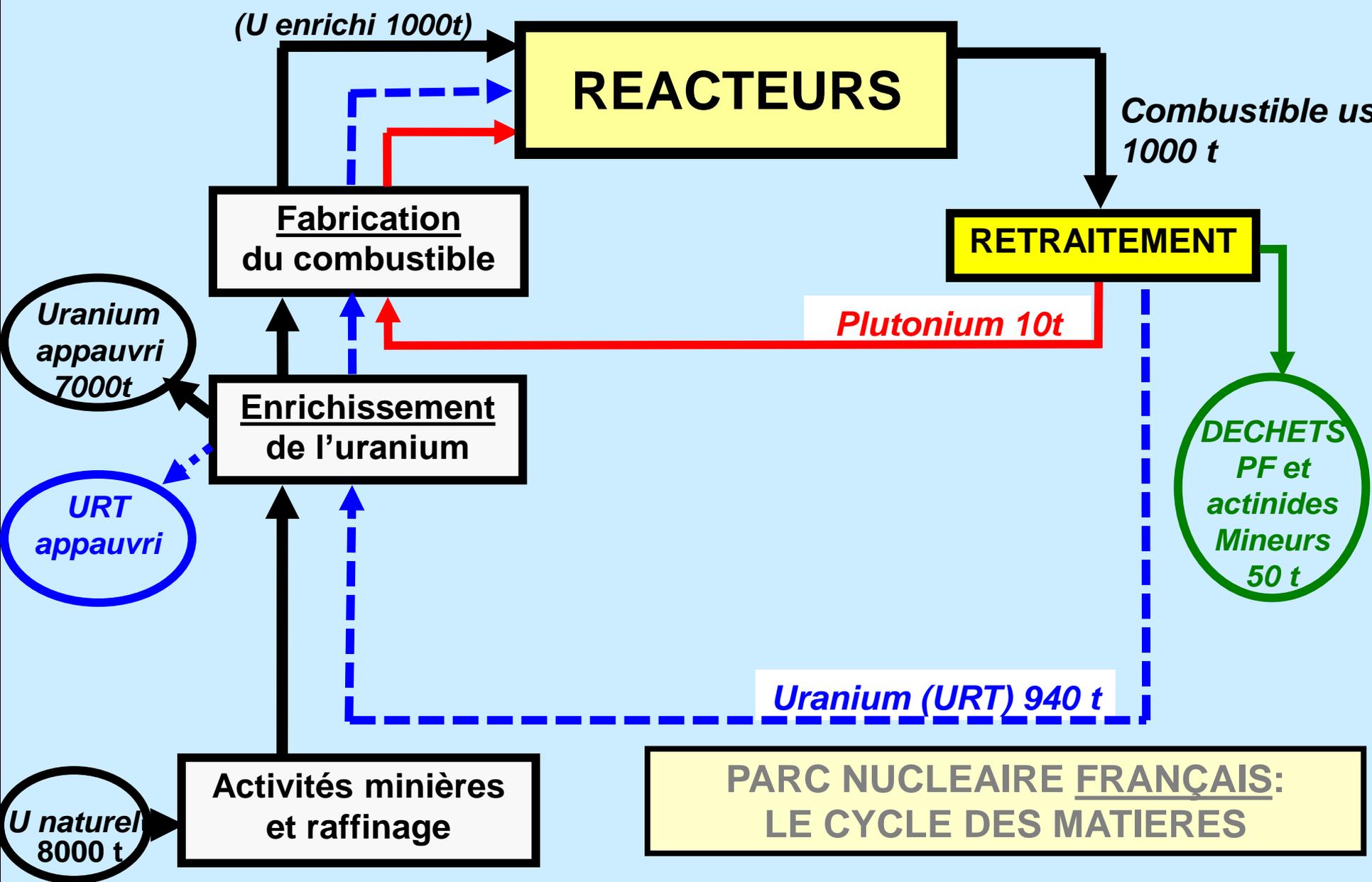
Les questions en suspens...

- ***des déchets particuliers ...***
(déchets historiques, déchets de démantèlement)

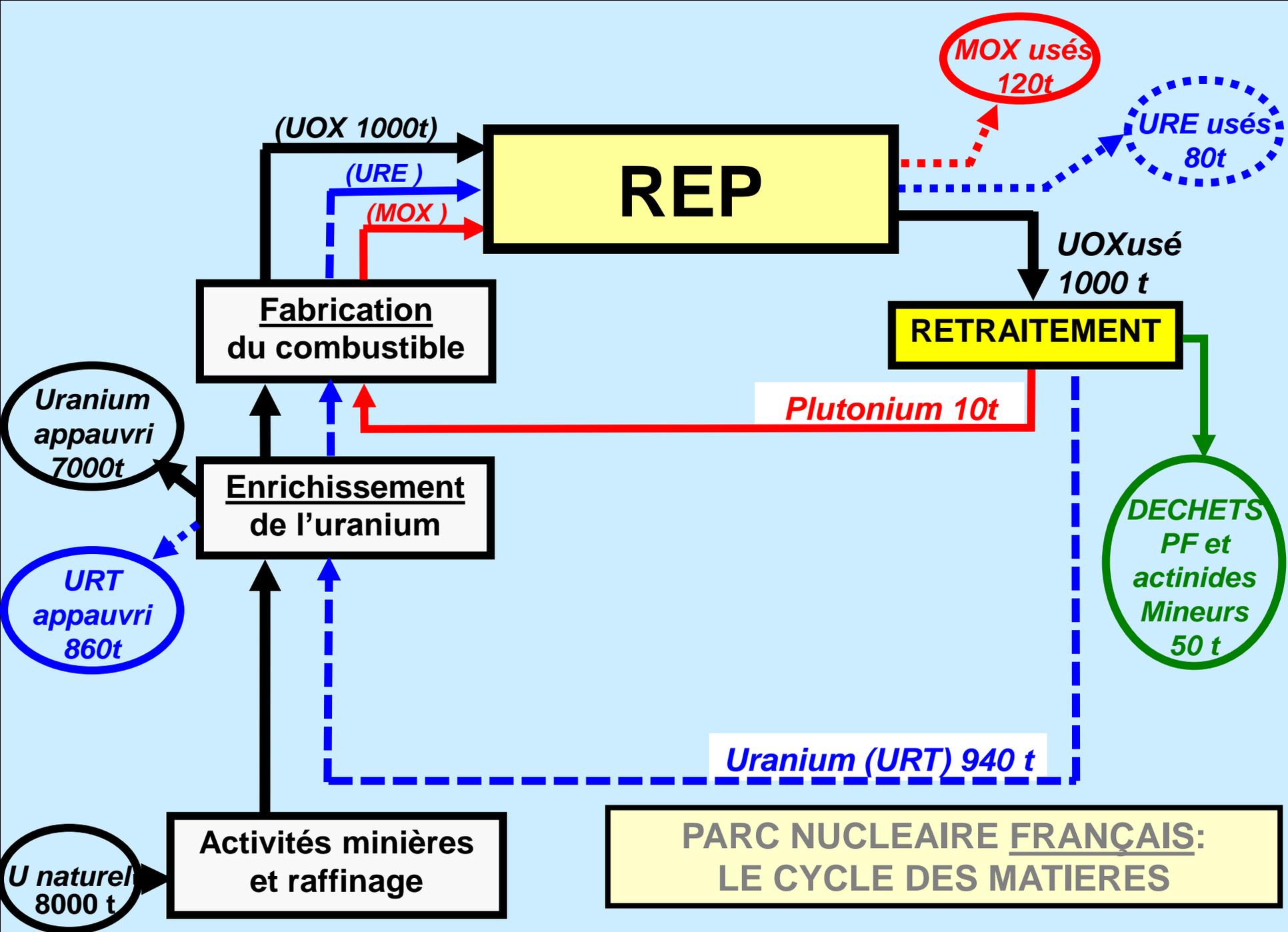
- ***Les limites du recyclage***
(le retraitement à La Hague, les réacteurs « moxables »)
(le devenir des MOX usés)



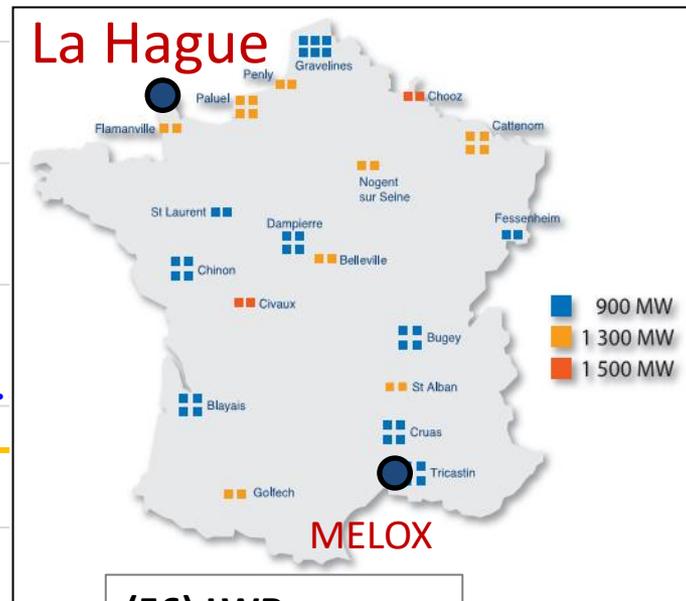
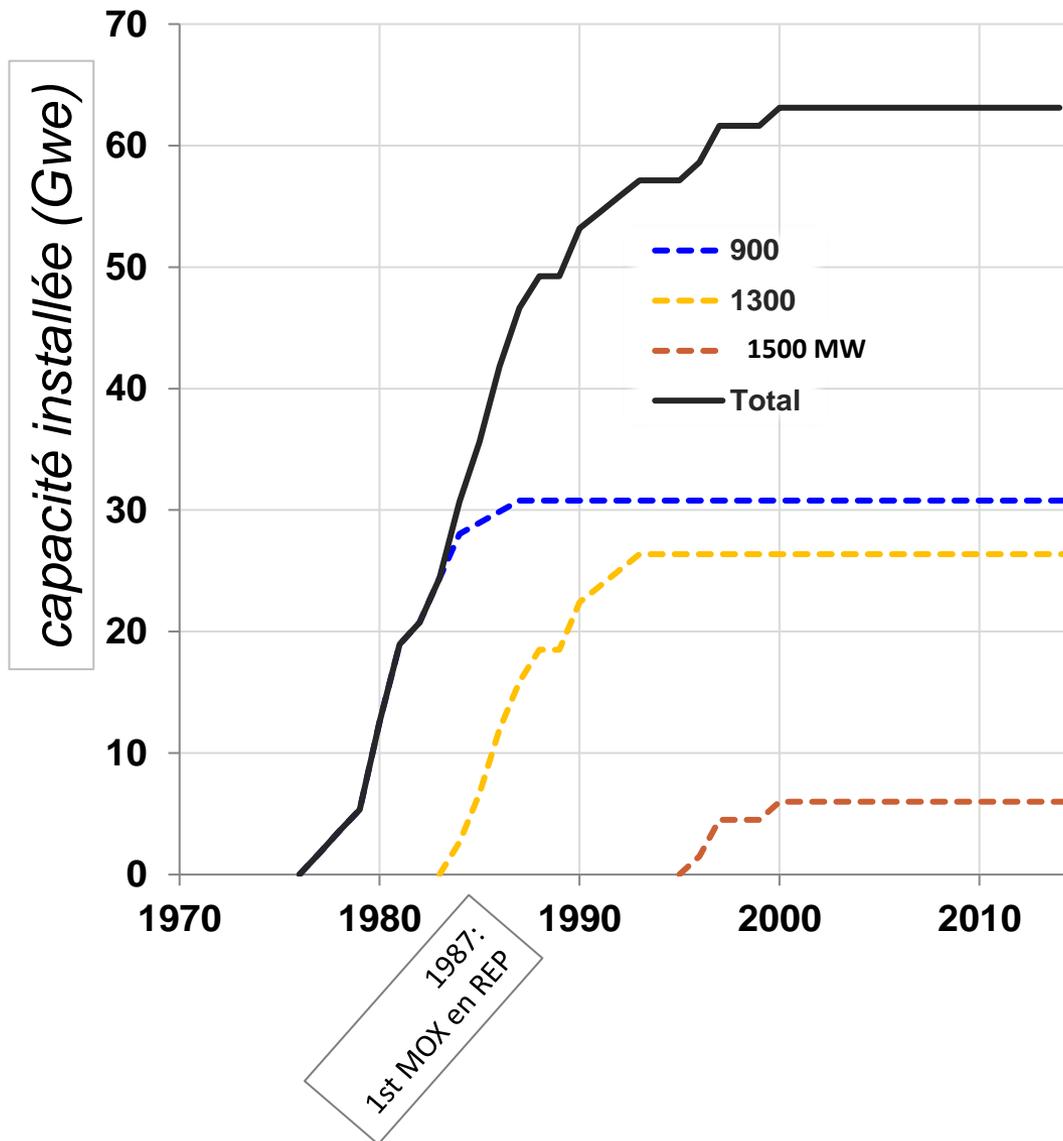




**PARC NUCLEAIRE FRANÇAIS:
LE CYCLE DES MATIERES**



LE PARC NUCLEAIRE FRANCAIS



(56) LWR
24 autorisés MOX
4 autorisés URE

LE PARC NUCLEAIRE FRANCAIS

- **Puissance installée: 63 (↘ 61) Gwe (MSI: 1977 -1999)**

- **32 réacteurs 900 Mwe (29 Gwe)**

- FESSENHEIM (1 2)	[1977]	UOX	6 réacteurs 100% UOX
- BUGEY (1 2 3 4)	[1979-1980]	UOX	
- CRUAS (1 2 3 4)	[1984-1985]	URE	4 réacteurs 100% URE
- TRICASTIN (1 2 3 4)	[1980-1981]	MOX : >1987	24 réacteurs 70% UOX/30% MOX
- SAINT LAURENT (1 2)	[1981]	MOX : >1987	
- BLAYAIS (1 2 3 4)	[1981-1983]	MOX : >1994 (2013)	
- DAMPIERRE (1 2 3 4)	[1980-1981]	MOX : >1996 et >	
- CHINON (1 2 3 4)	[1982-1987]	MOX : >1998 et >	
- GRAVELINES (1 2 3 4 5 6)	[1980-1985]	MOX : > 2007	

- **20 réacteurs 1300 Mwe (26 Gwe)**

tous 100% UOX [>1986]

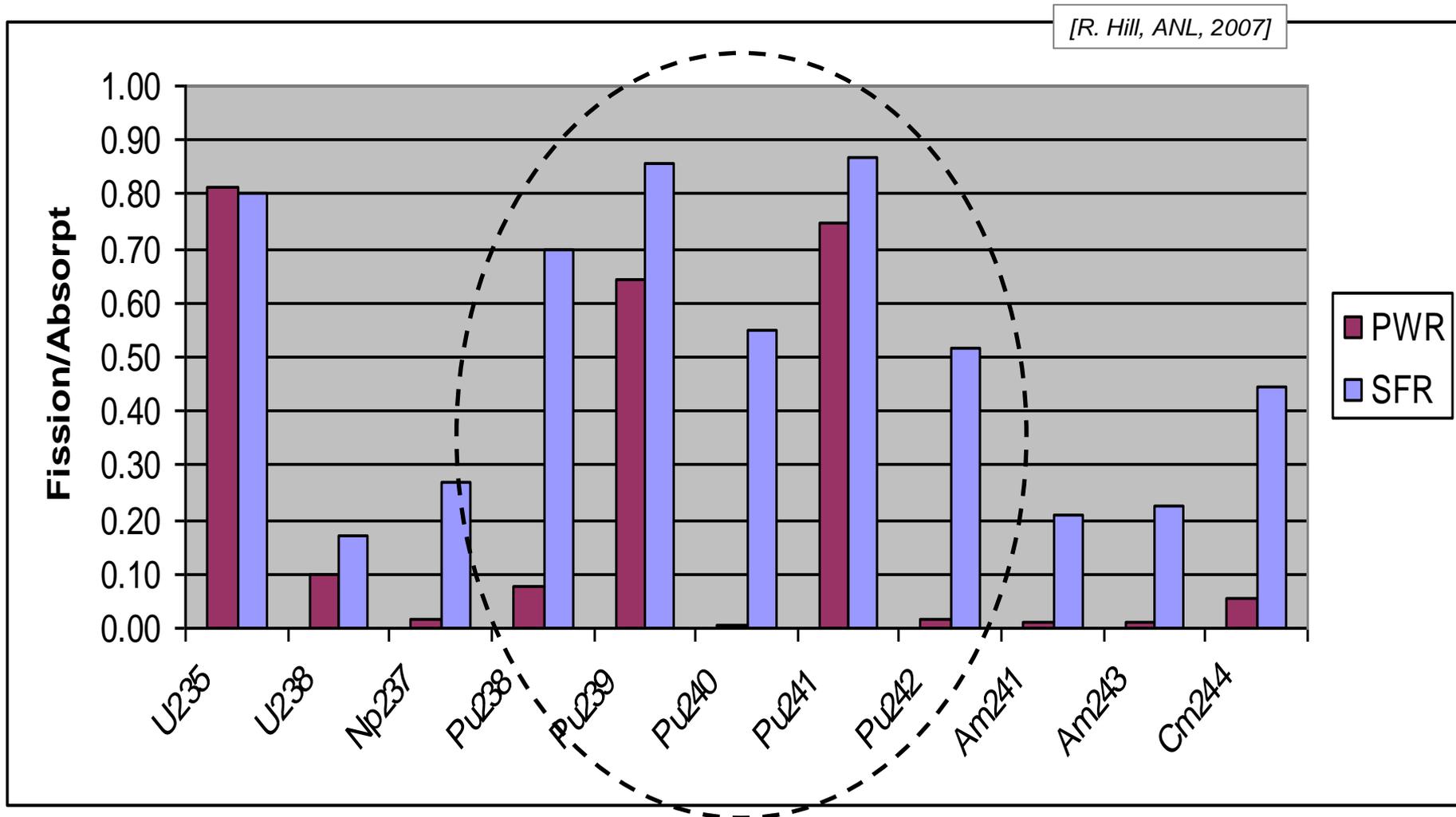
- **4 réacteurs 1450 Mwe (6 GWe)**

tous 100% UOX [> 1996]

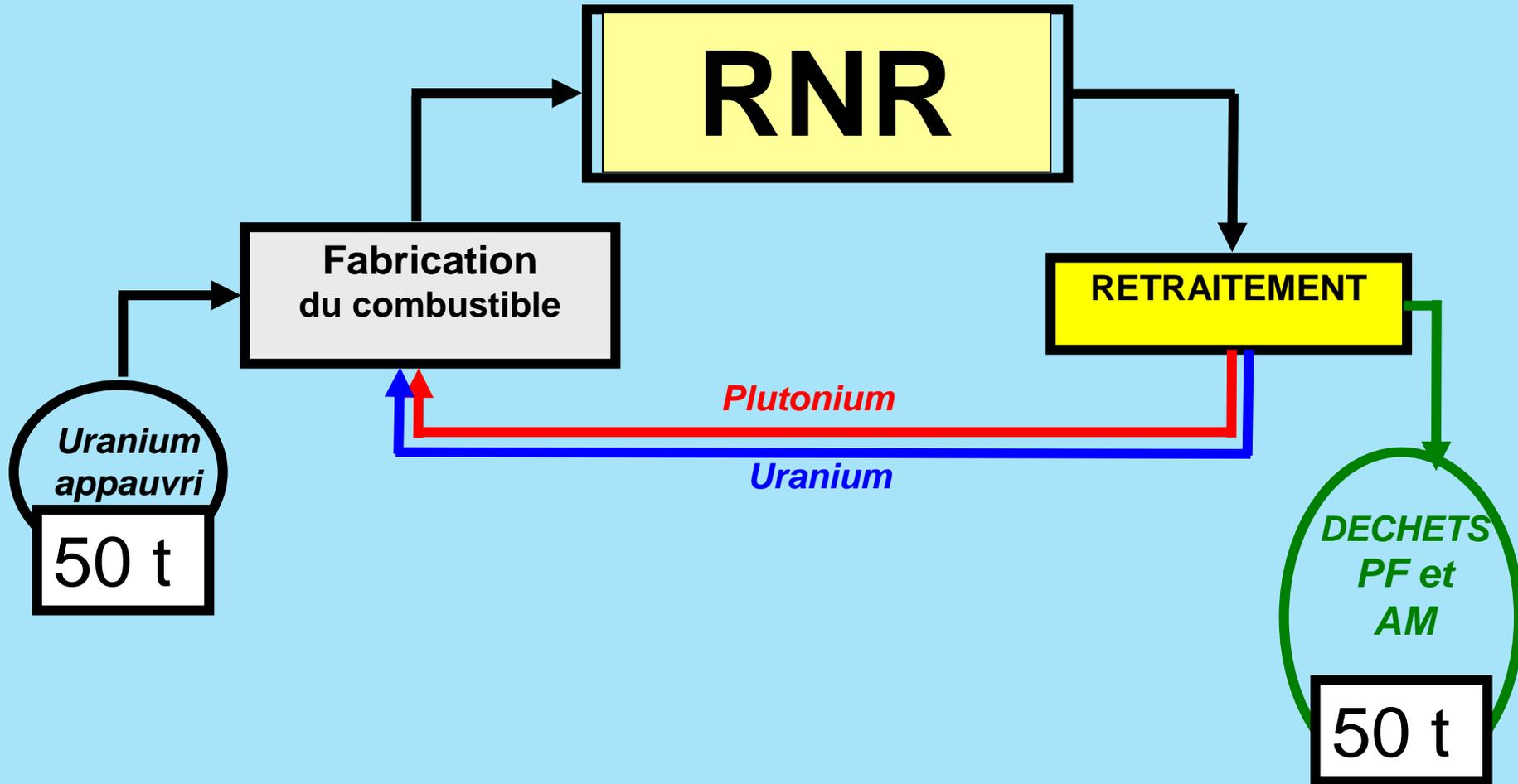
- **(1 réacteur 1650 Mwe (EPR Flamanville))**

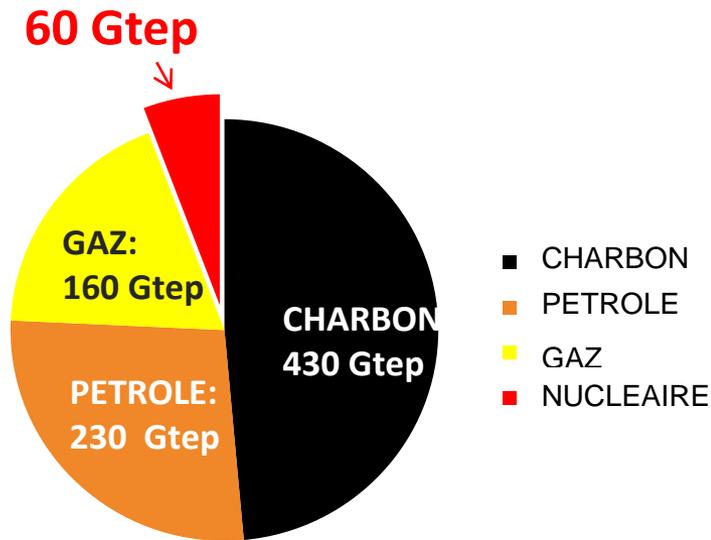
[>2017 (?)]

LES OPTIONS DE LONG TERME: POURQUOI DES NEUTRONS RAPIDES ?



UN PARC DE RNR ?



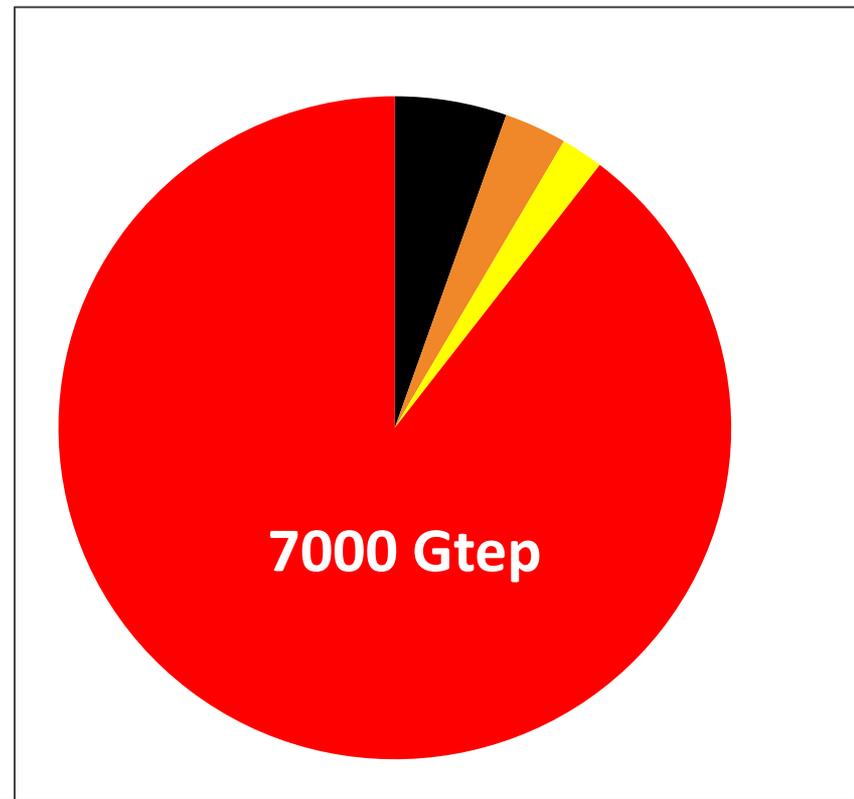
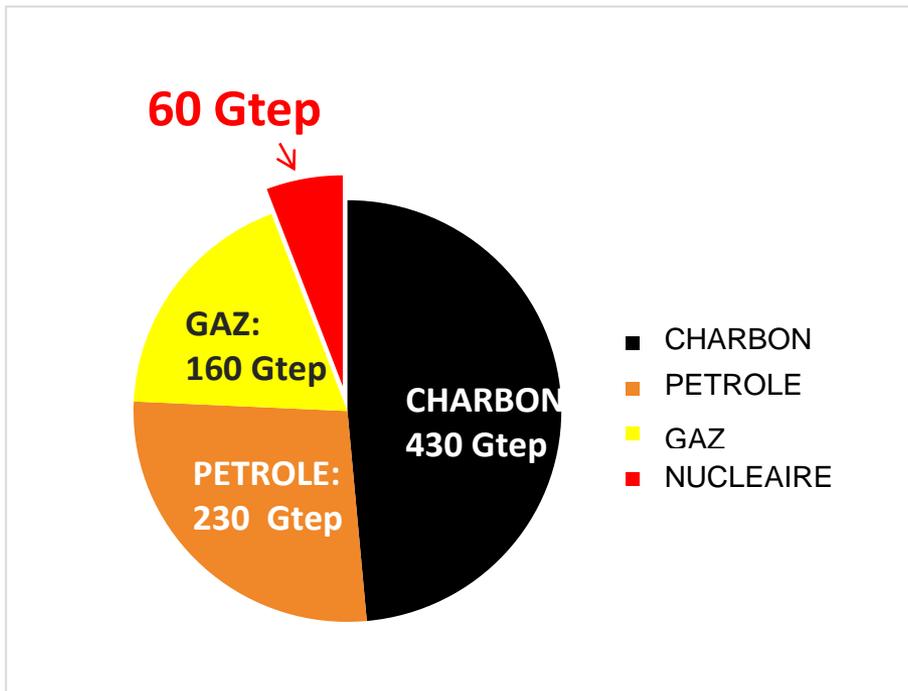


Utilisation (actuelle) de l'uranium
en réacteurs à eau

RESSOURCES CONVENTIONNELLES IDENTIFIEES

(BP statistical review, 2016 and NEA, 2014)

(OIL 239 Gt, COAL 890Gt, GAS 186 Tm³, URANIUM 5Mt)



Multirecyclage de l'uranium et du plutonium en réacteurs rapides (GenIV)

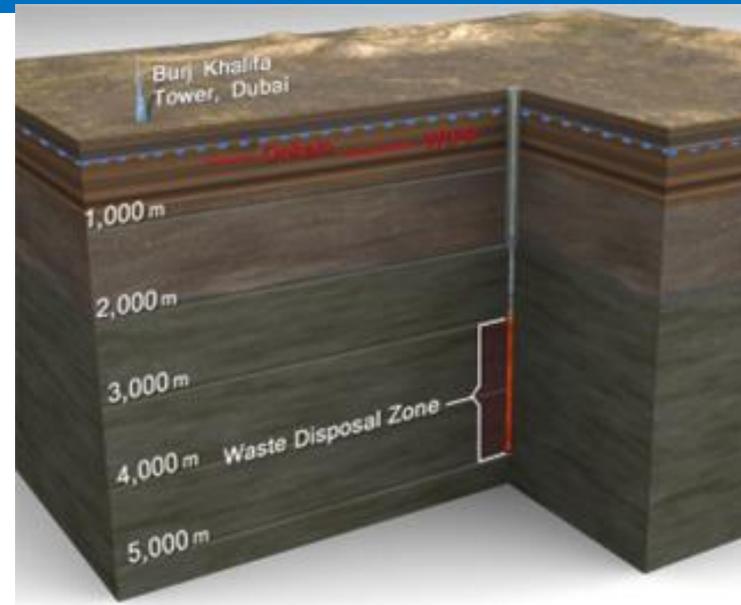
RESSOURCES CONVENTIONNELLES IDENTIFIEES
 (BP statistical review, 2016 and NEA, 2014)
 (OIL 239 Gt, COAL 890Gt, GAS 186 Tm³, URANIUM 5Mt)

Les questions en suspens...

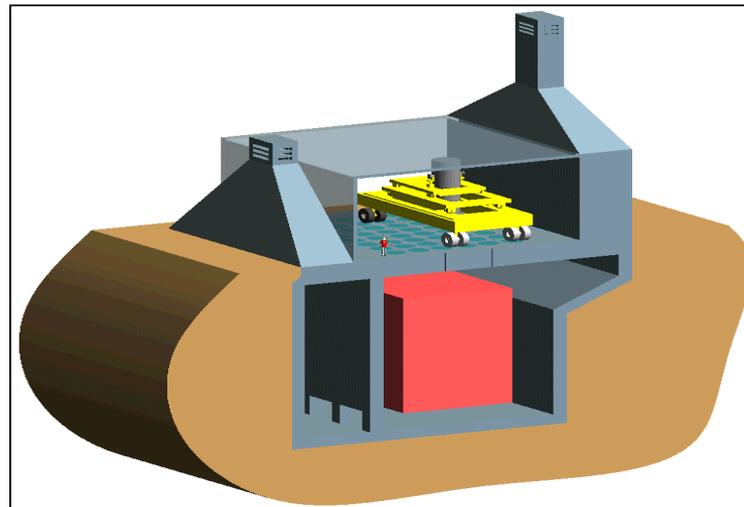
- *des déchets particuliers ...*
(*déchets historiques, déchets de démantèlement*)
- *Les limites du recyclage*
(*le retraitement à La Hague, les réacteurs « moxables »*)
(*le devenir des combustibles MOX usés...*)
- *le stockage géologique , des alternatives ?*

ALTERNATIVES AU STOCKAGE GEOLOGIQUE ?

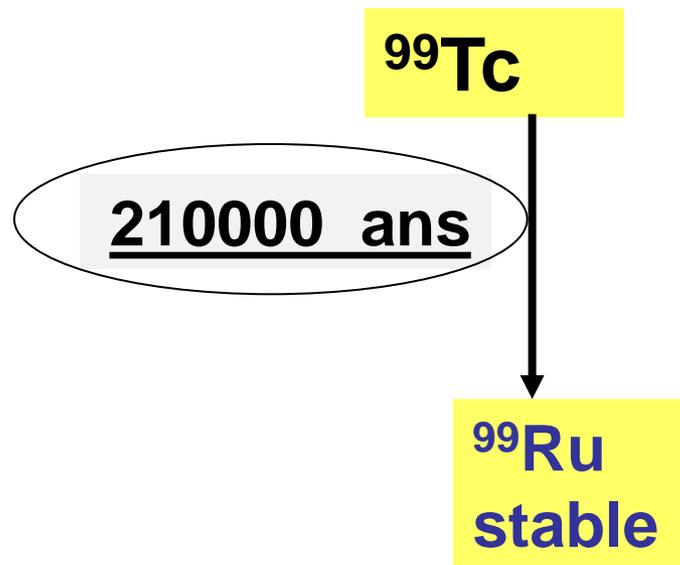
« DEEP BOREHOLES » ?



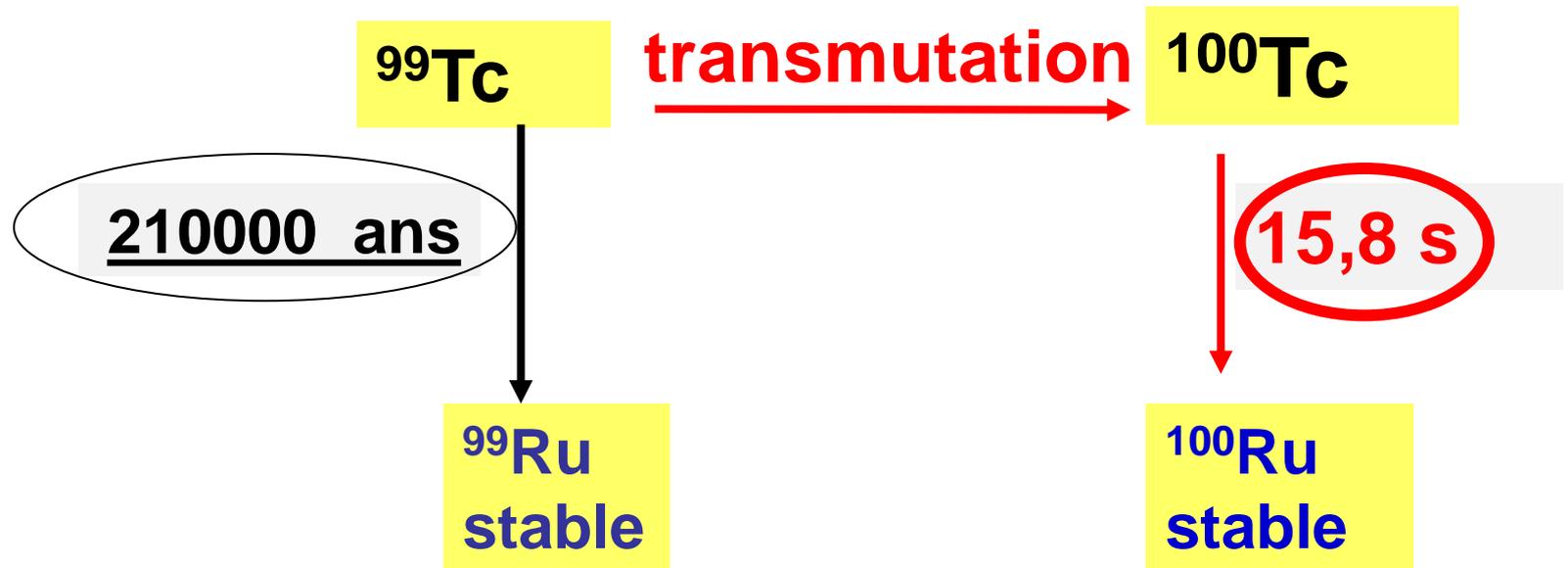
ENTREPOSAGE DE (TRES) LONGUE DUREE ?



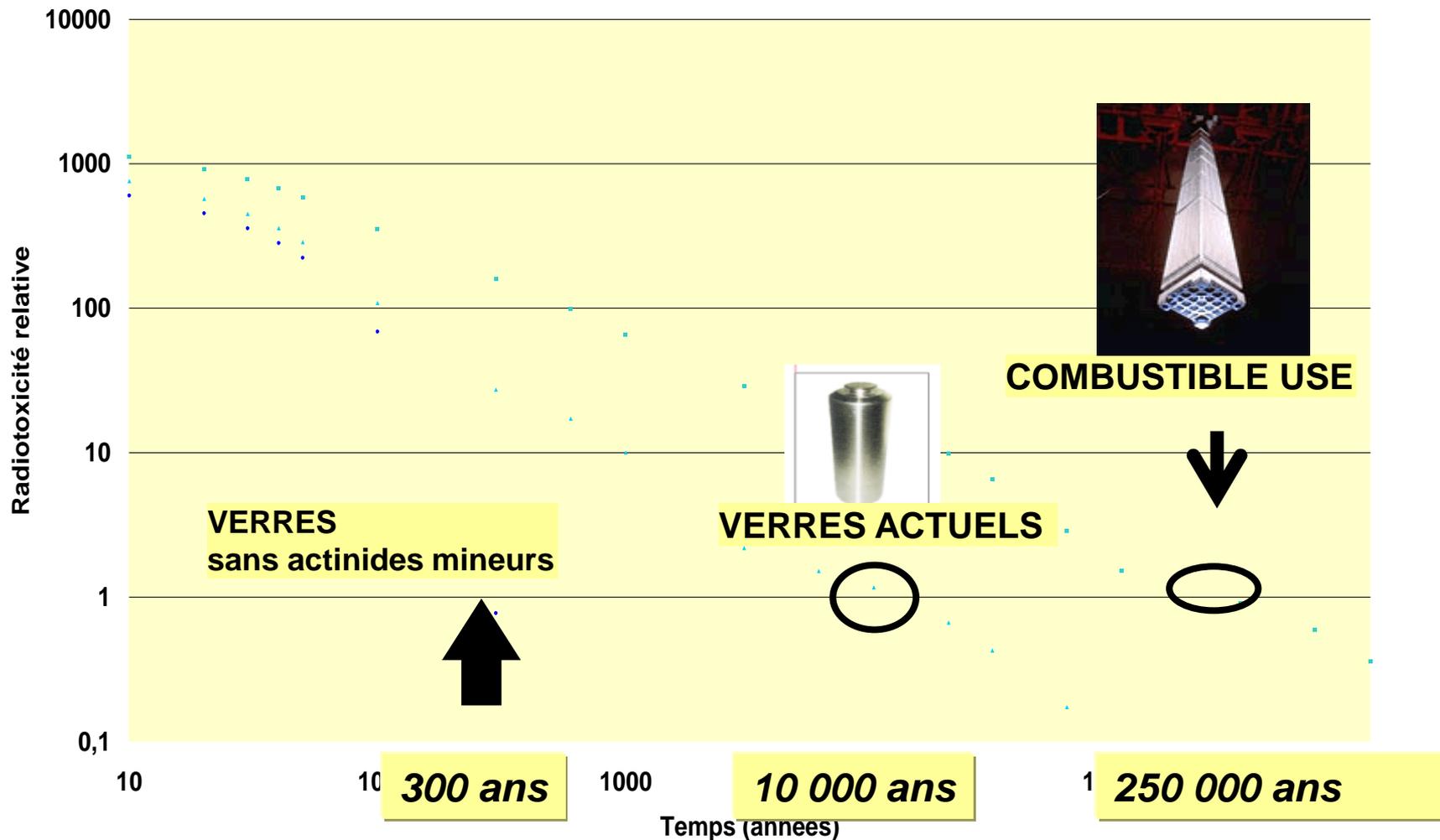
LA TRANSMUTATION : L'EXEMPLE DU TECHNETIUM



LA TRANSMUTATION : L'EXEMPLE DU TECHNETIUM



LA RADIOTOXICITE A LONG TERME

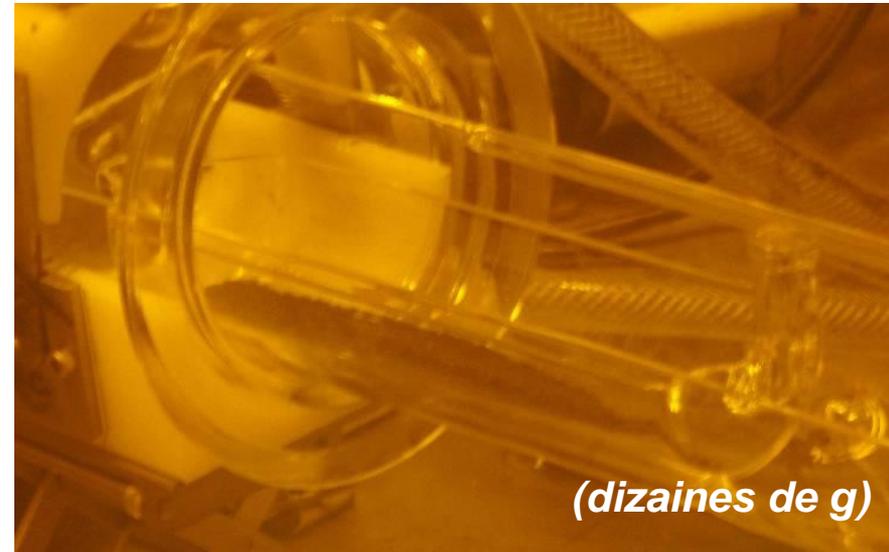
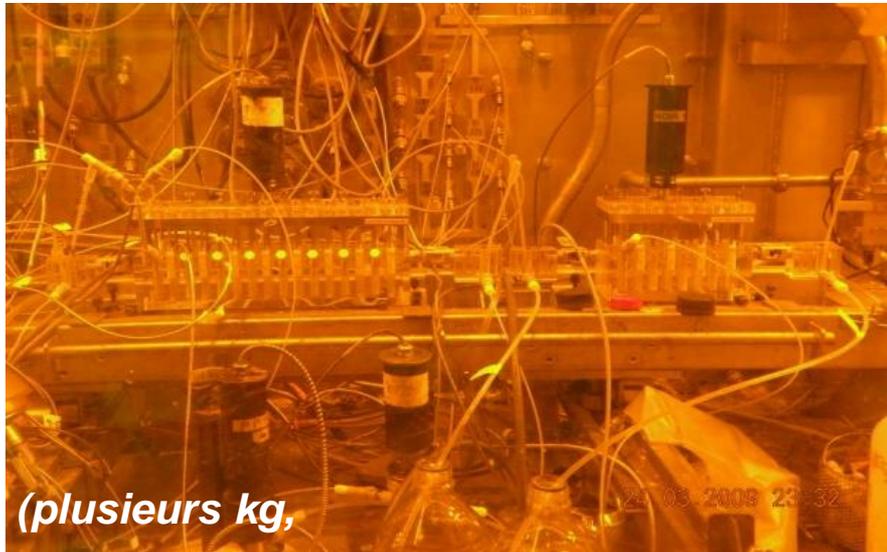


Le plutonium: 1% du combustible utilisé

Les actinides mineurs: 1/1000 du combustible utilisé

LA SEPARATION DES AM: un acquis

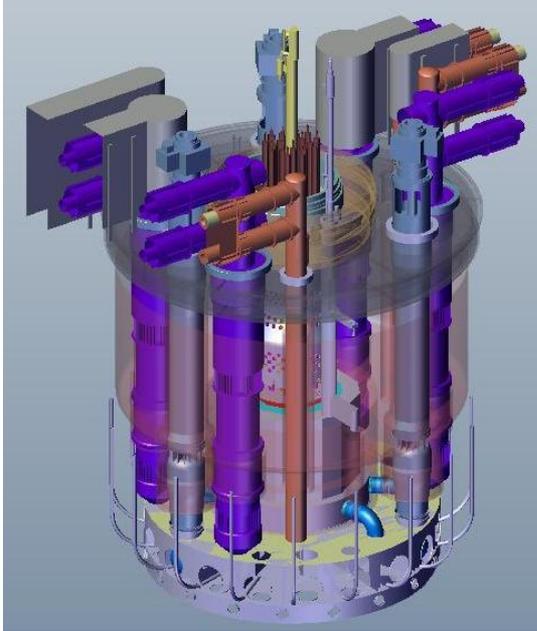
- une recherche très foisonnante depuis 30 années
- des concepts testés au laboratoire sur combustibles réels (échelle de plusieurs kg, technologies représentatives)



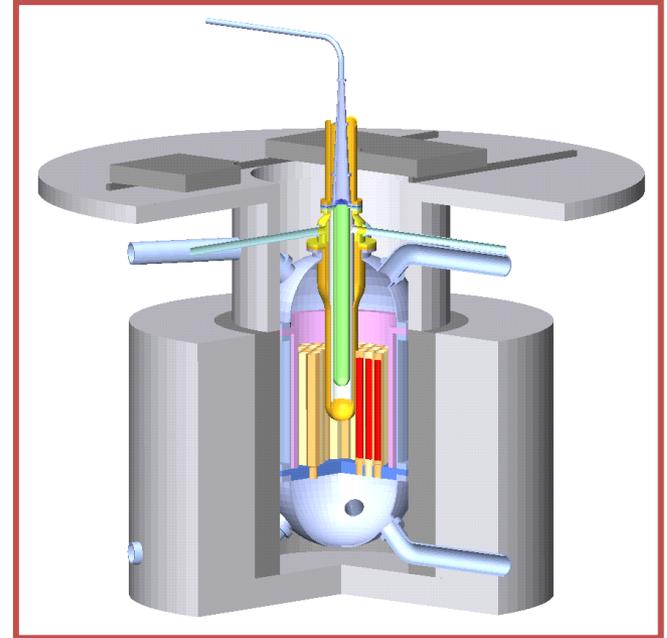
Co-précipitation

Calcination

QUELS OUTILS POUR TRANSMUTER?



*au sein de réacteurs
electro-nucléaires
(la « 4^{ème} génération »)*



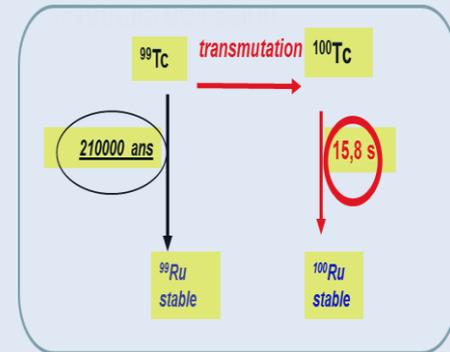
*au sein de dispositifs
dédiés (ADS...)*

des systèmes « à neutrons rapides »

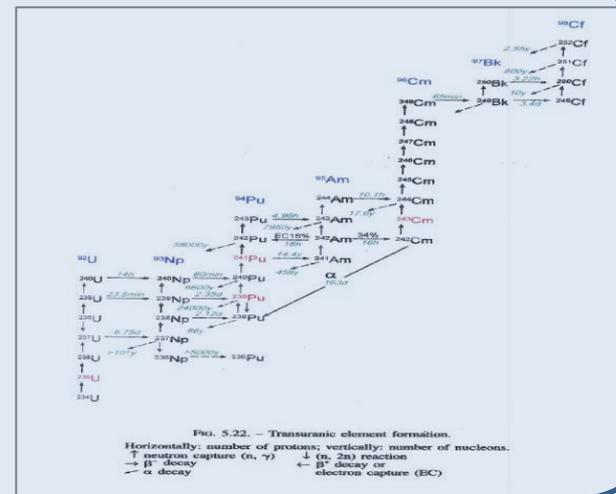
COMMENT TRANSMUTER?

transformation sous flux neutronique

-PFVL : capture neutron

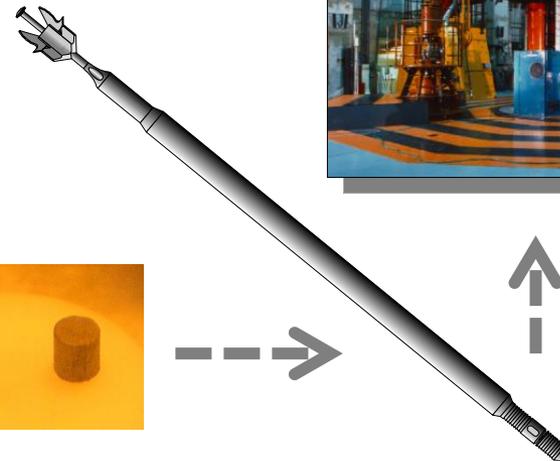
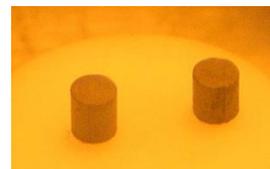
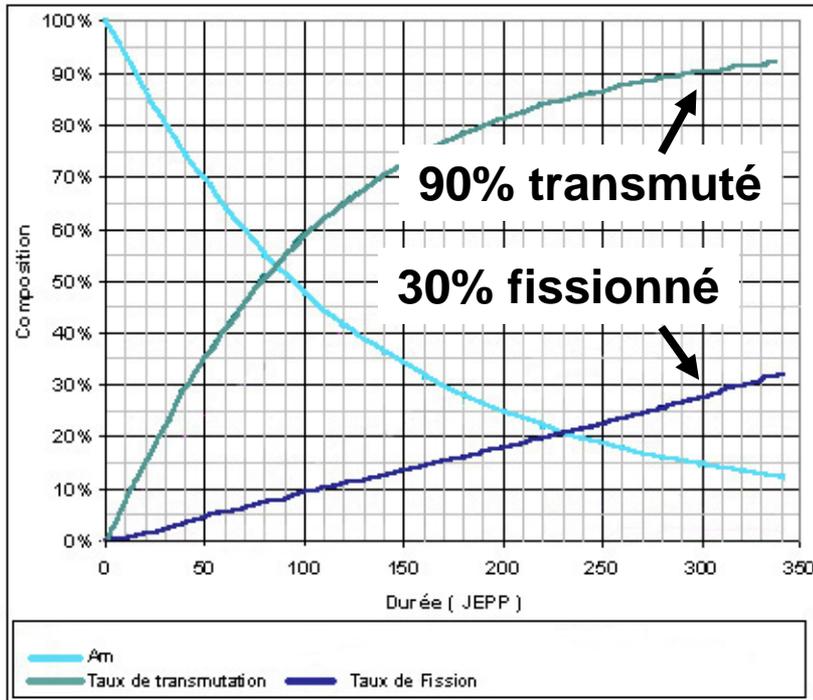


**-TRU: il faut fissionner
(une capture
« déplace le problème »)**

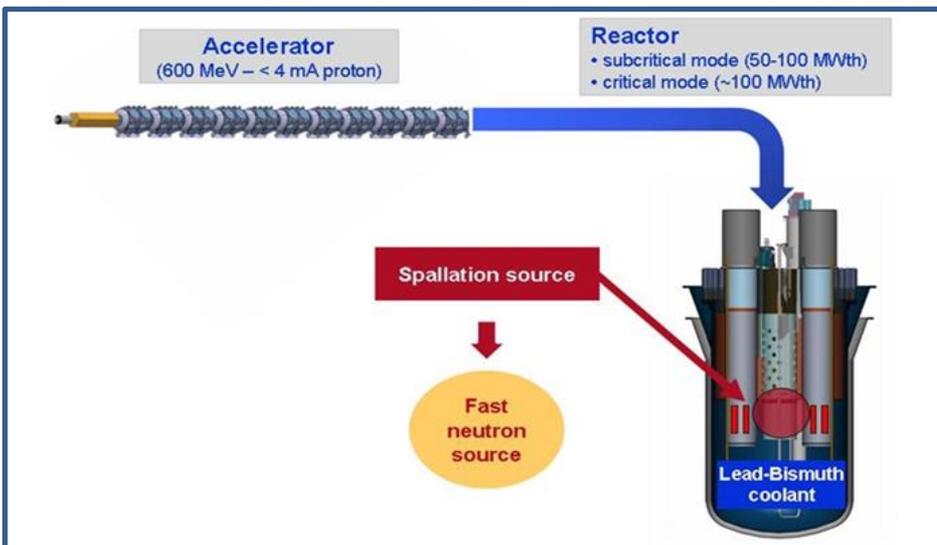


LA TRANSMUTATION DES AM: *des expériences*

IRRADIATION ECRIX en RNR (Phénix)



LA TRANSMUTATION DES AM: et des projets



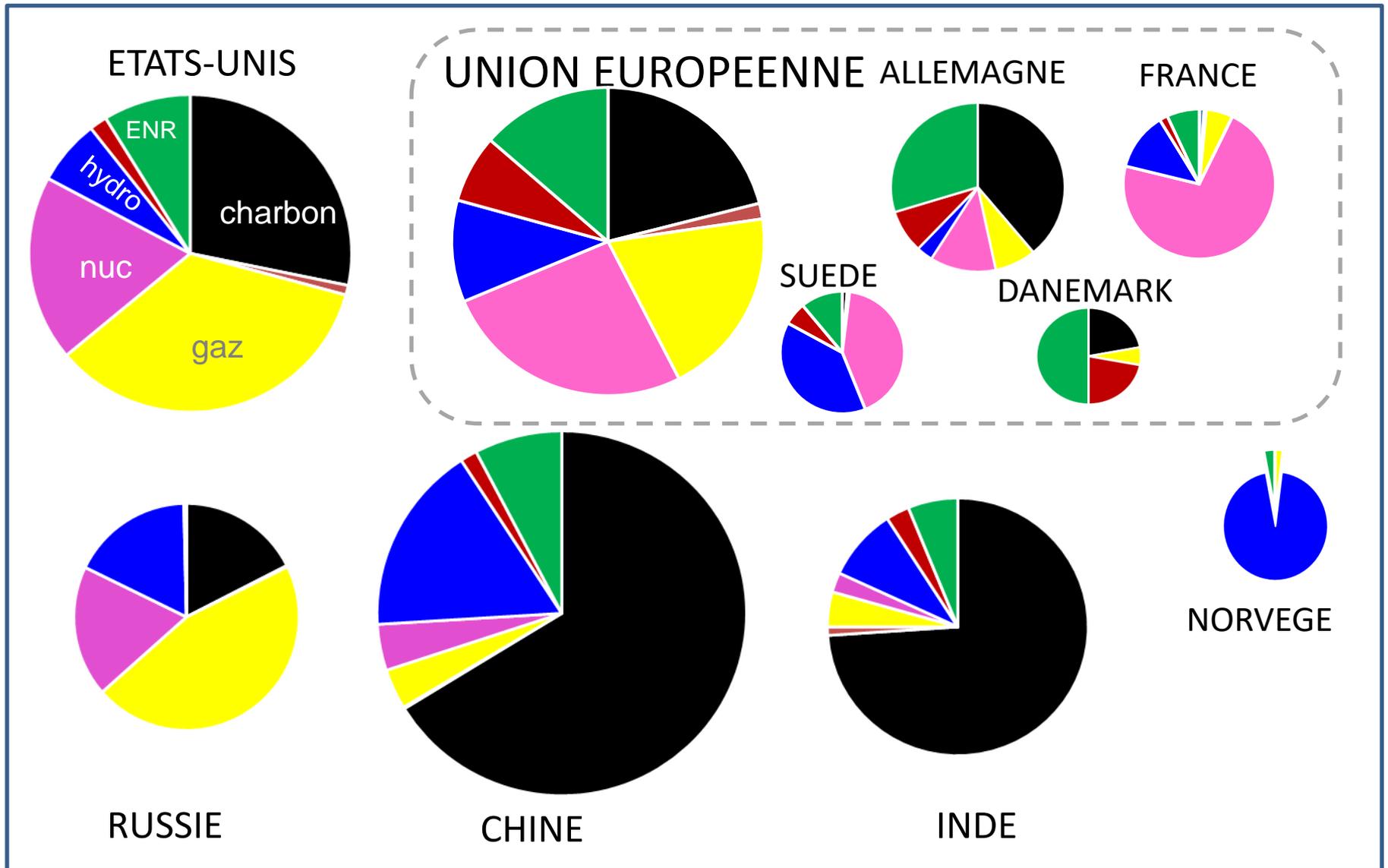
...et de MYRRHA à échelle industrielle:
encore ~ facteur 10 sur la puissance
(de l'ordre du GW th)

- **« le jeu en vaut-il la chandelle? »**
(« *toujours besoin d'un stockage...? »*)
(*des risques diminués à long terme,*
mais aussi des détriments immédiats)
- **finaliser en premier lieu la question du plutonium**
(*tout autant toxique, 10 fois plus abondant*)
(*la transmutation des AM,*
un sujet de recherches pour le (très) long terme?)

Quelques éléments de conclusion...

- **La gestion des déchets nucléaires aujourd'hui : entreposage-(recyclage)- confinement**
- **Le stockage géologique, la meilleure option ?**
(controversé, pas encore en service, mais « consensus institutionnel » international)
- ***Des options avancées demain ?***
- ***Difficulté intergénérationnelle: ne pas laisser des charges aux générations futures, mais ne pas obérer leur choix...***

L'ENERGIE NUCLEAIRE AUJOUR'HUI



PRODUCTION D'ELECTRICITE EN 2019

INVENTAIRE “MATIERES” (Andra, 2018)

- UOX usé :

2018 : 12000 t

(# stabilisé)

- MOX usé:

2018: 1800 tonnes

2035 : 4000tonnes (# 250t Pu)

- URE usé :

2018 :580 t

2035 :1800 t

- U appauvri

2018 : 310 000 t

2035: 450 000 t

Pu

50t

50t

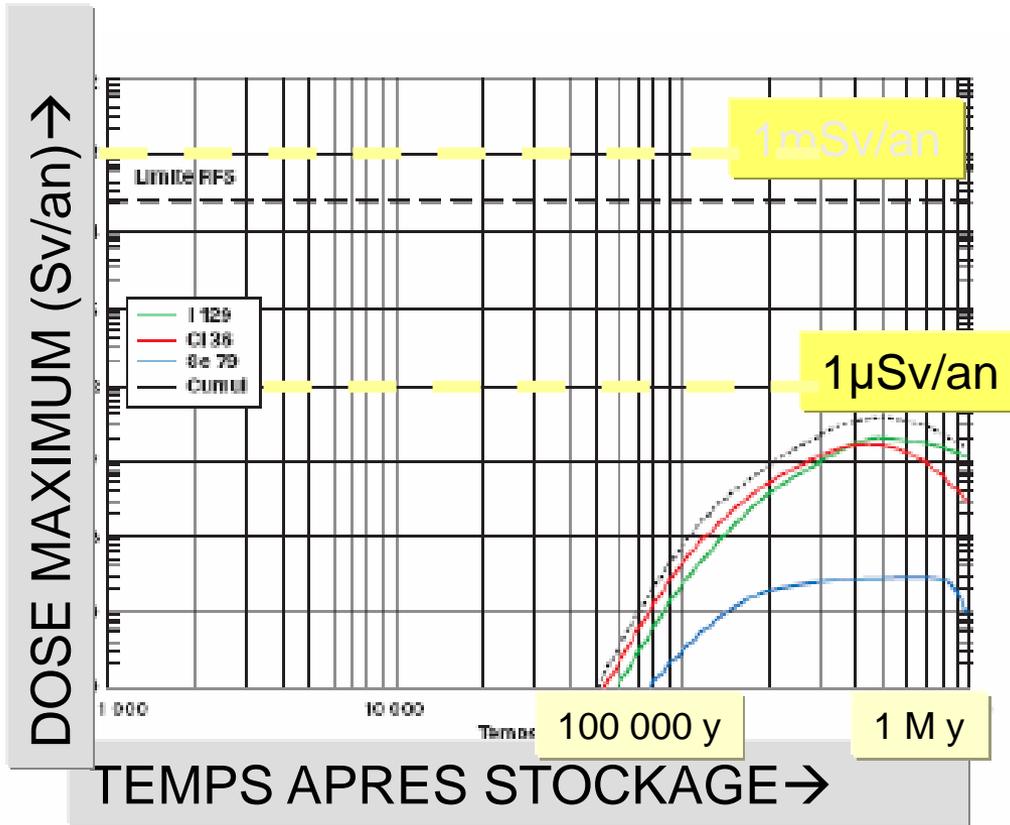
URT

30 000 t

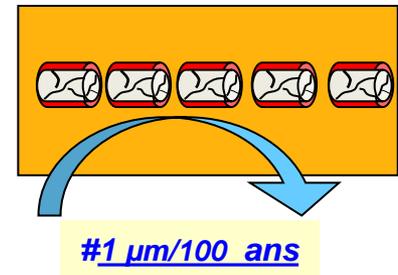
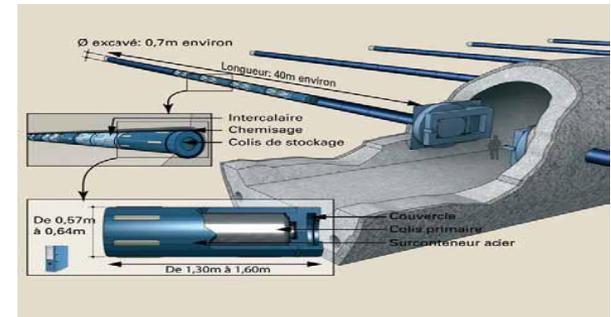
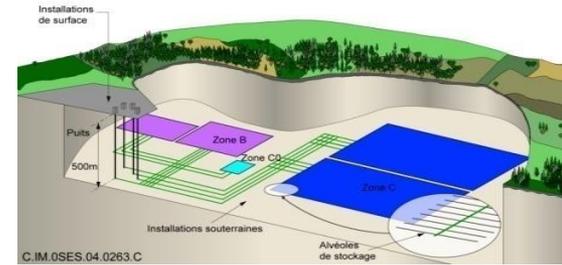
Combustibles usés entreposés

matières

POURQUOI TRANSMUTER?

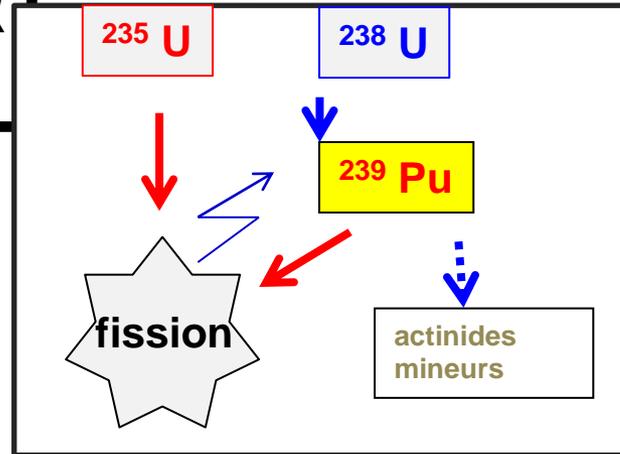


(ANDRA, « Rapport argile », 2005)

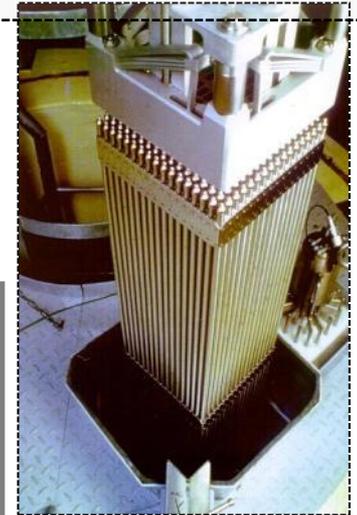


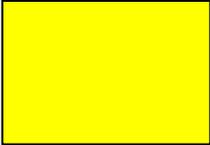
LE COMBUSTIBLE « USE »

REACTEUR



Combustible « usé »



	URANIUM	(95%)
	PRODUITS DE FISSION	(4%)
	PLUTONIUM	(1%)
	ACTINIDES MINEURS	(0.1%)