

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

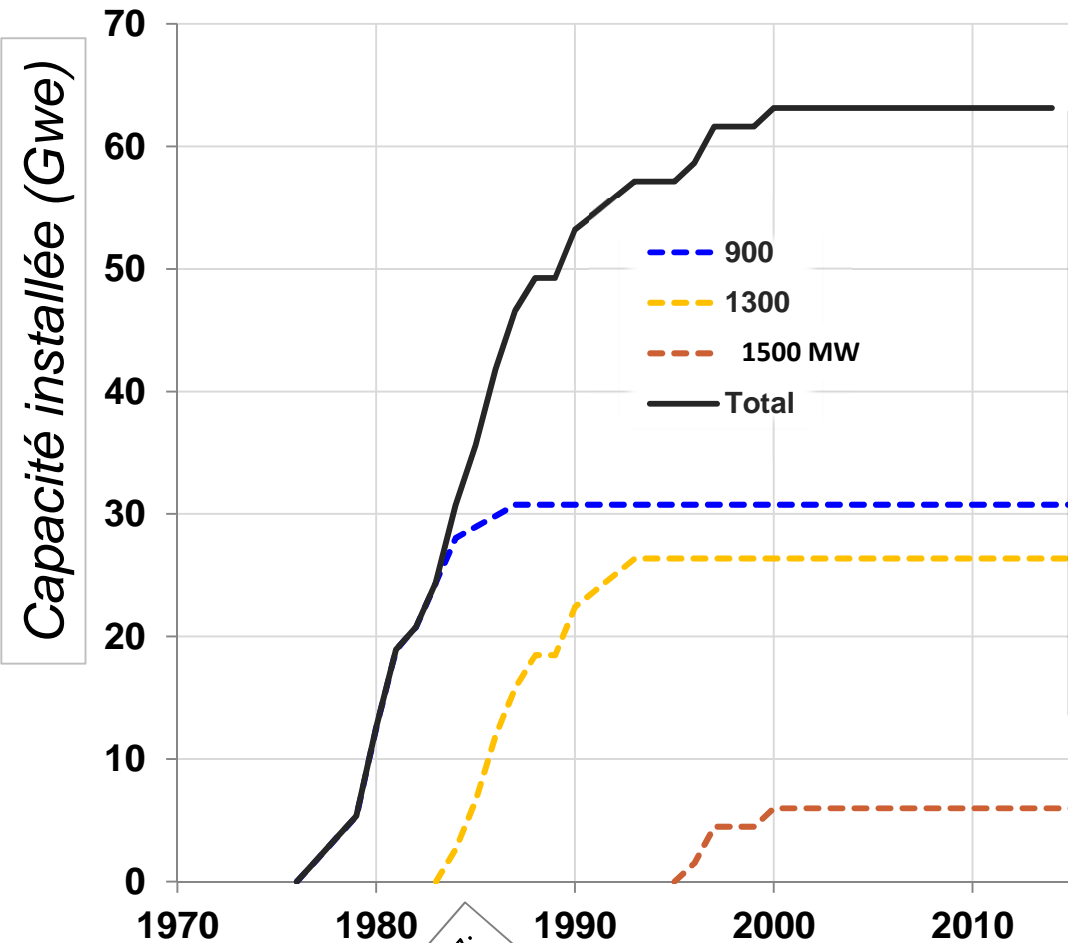
*Journées SFP
Le Creusot, 21-23 septembre 2016*

***LE CYCLE DU COMBUSTIBLE (UOX et MOX)
DANS LE PARC FRANCAIS***

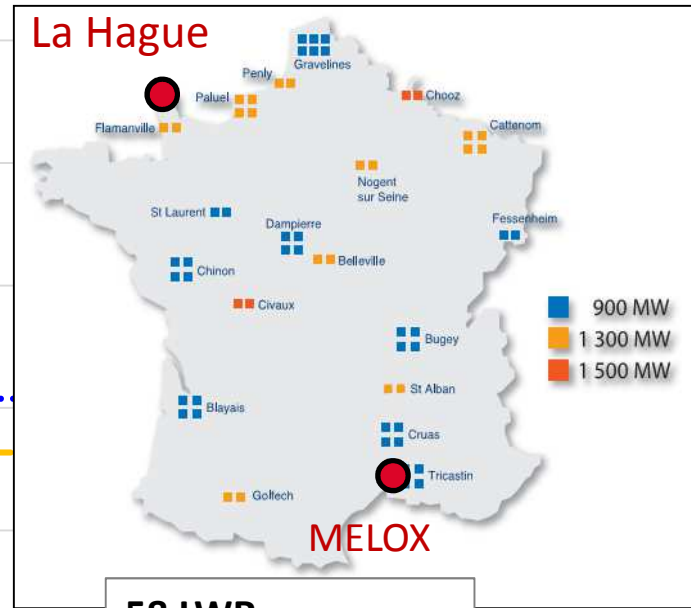
Bernard BOULLIS

- 1- Le parc français actuel et son cycle
- 2- L'apport de réacteurs à neutrons rapides
 - la gestion du plutonium
 - la transmutation des actinides mineurs
- 3- Quels enjeux sur les technologies de recyclage?

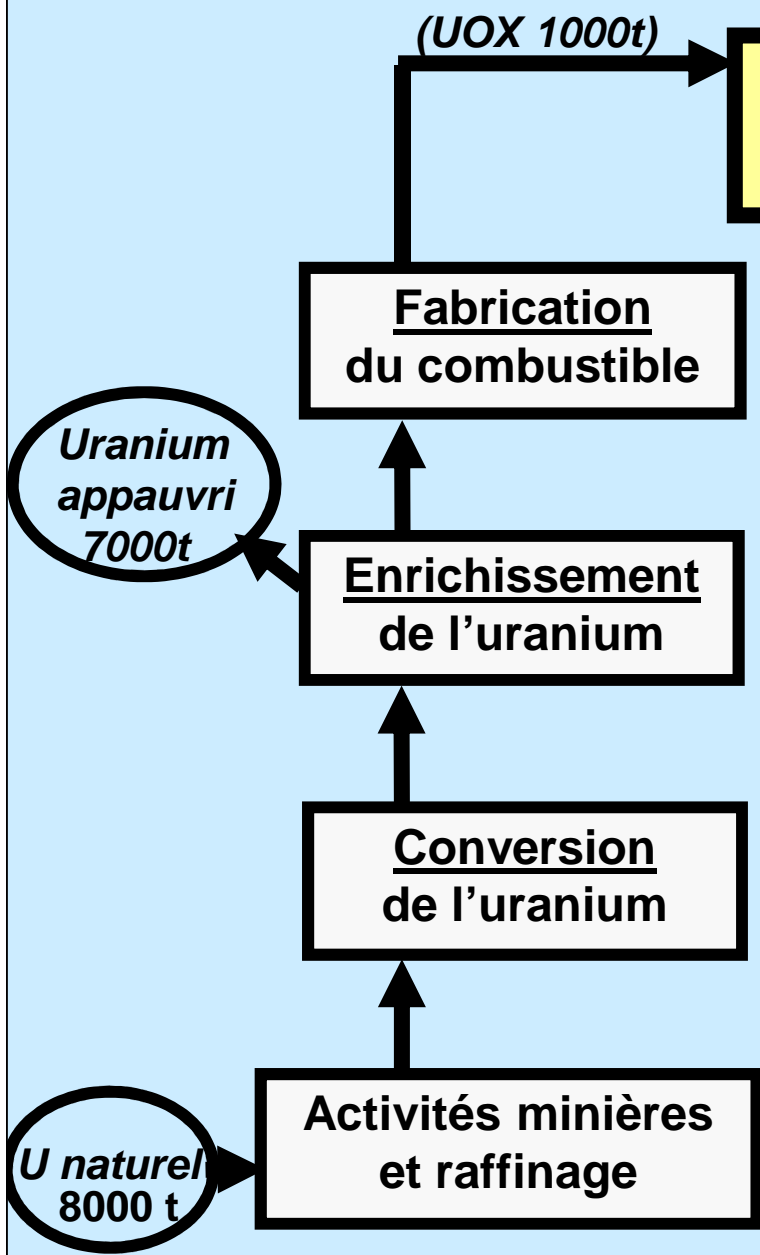
LE PARC NUCLEAIRE FRANÇAIS



1987:
1st MOX en REP



58 LWR
24 autorisés MOX
4 Autorisés REU



REP

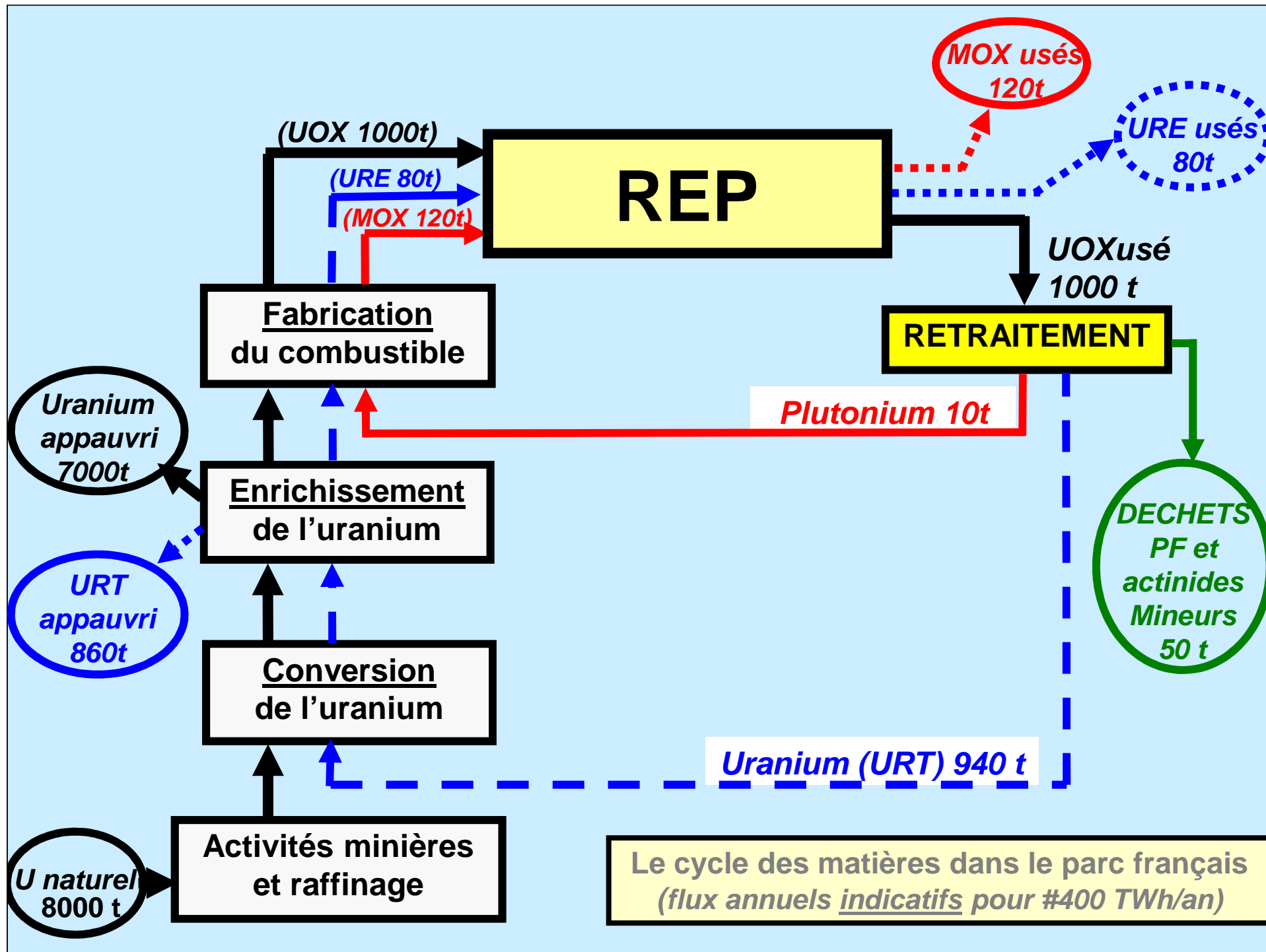
**UOXusé
1000 t**



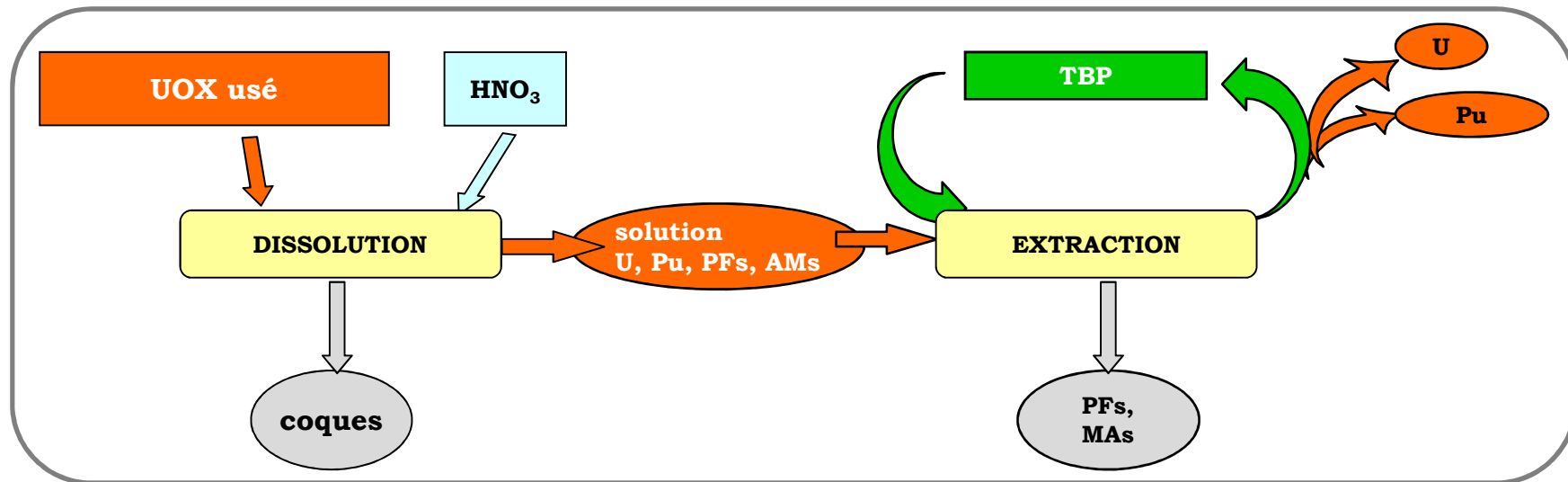
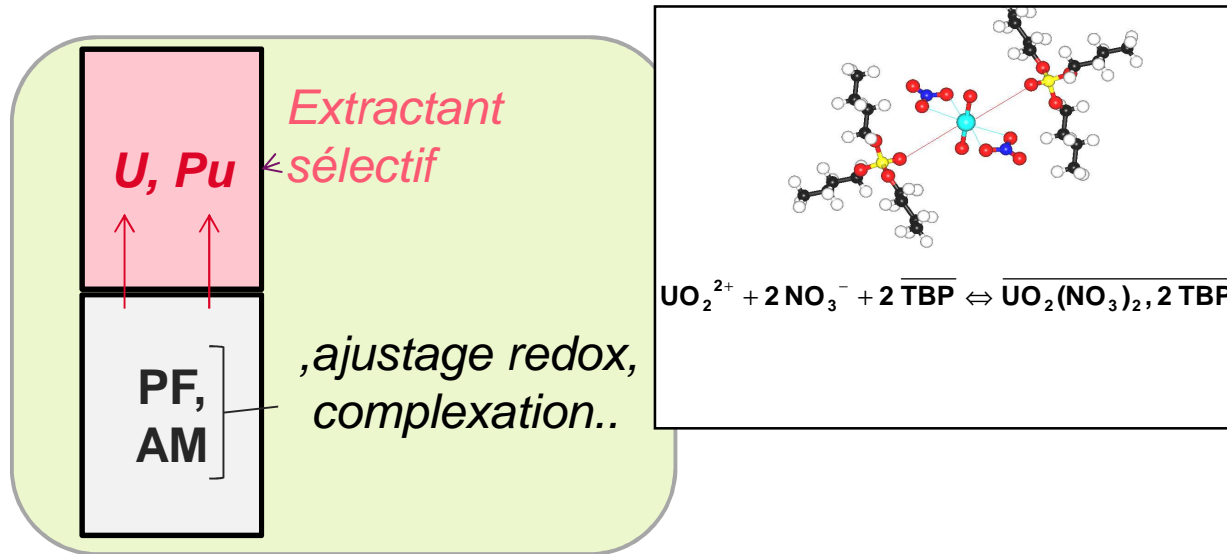
Uranium : 94%
Produits de fission : 5%
« Transuraniens » : 1%
(Plutonium, actinides mineurs 0.1%)

1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	A
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104
Fr	Ra	An	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun								
LANTHANIDES		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
ACTINIDES		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Le cycle des matières dans le parc français
(flux annuels indicatifs pour #400 TWh/an)



LE TRAITEMENT DU COMBUSTIBLE USE



LES DECHETS NUCLEAIRES

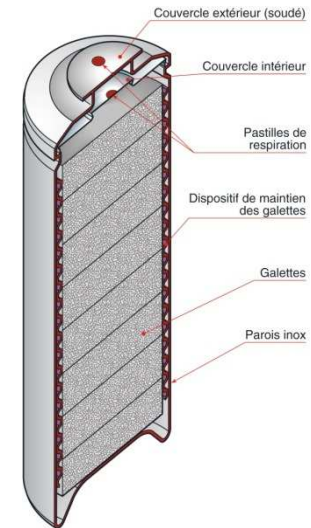
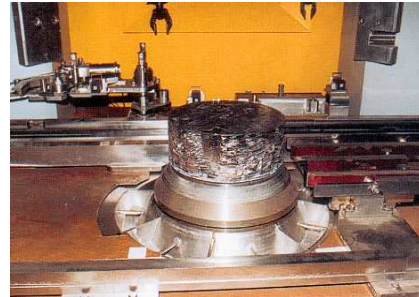
VERRES



150 litres,
PF #15%, #2KW, >15 000 TBq

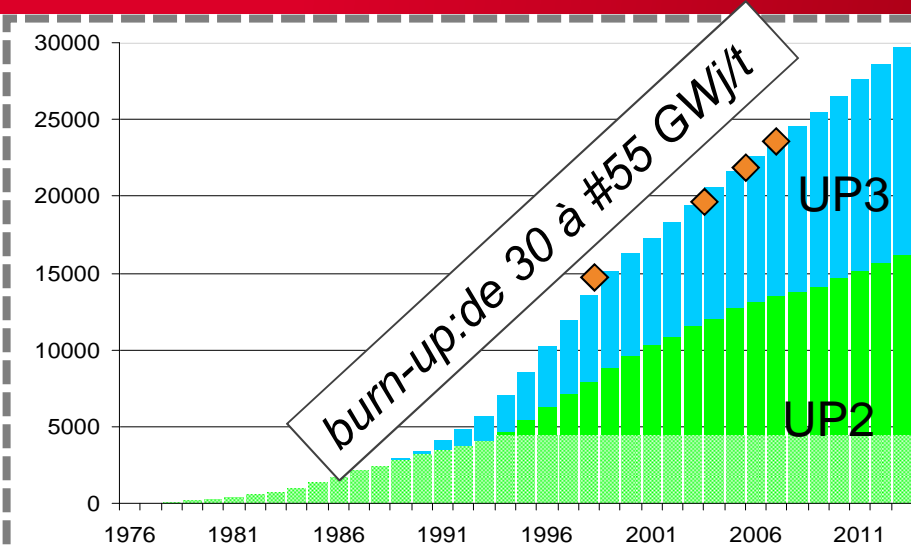
10-15 conteneurs/réacteur/an

COQUES



TECHNOLOGIQUES

LE RECYCLAGE EN FRANCE

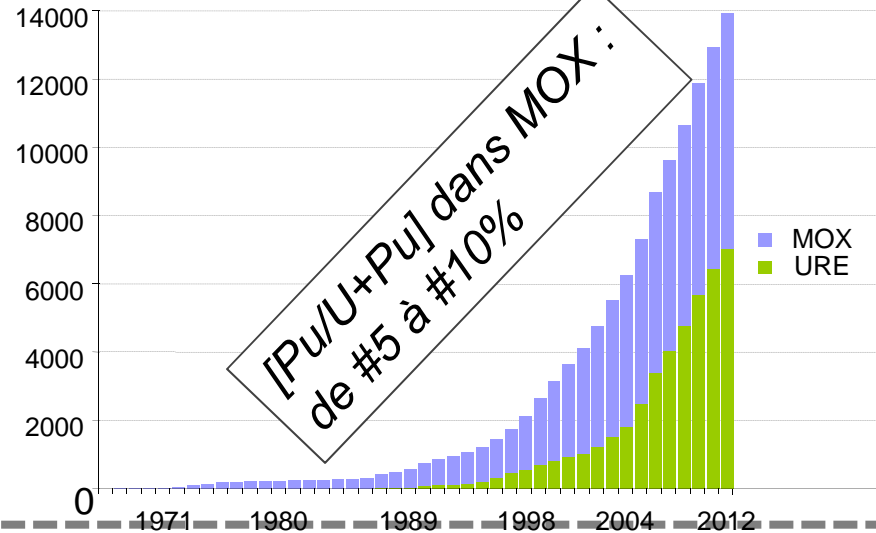


> 30 000 tonnes UOX
 ◆ MOX : #70 tonnes traitées)



2300 tonnes MOX

Assemblies

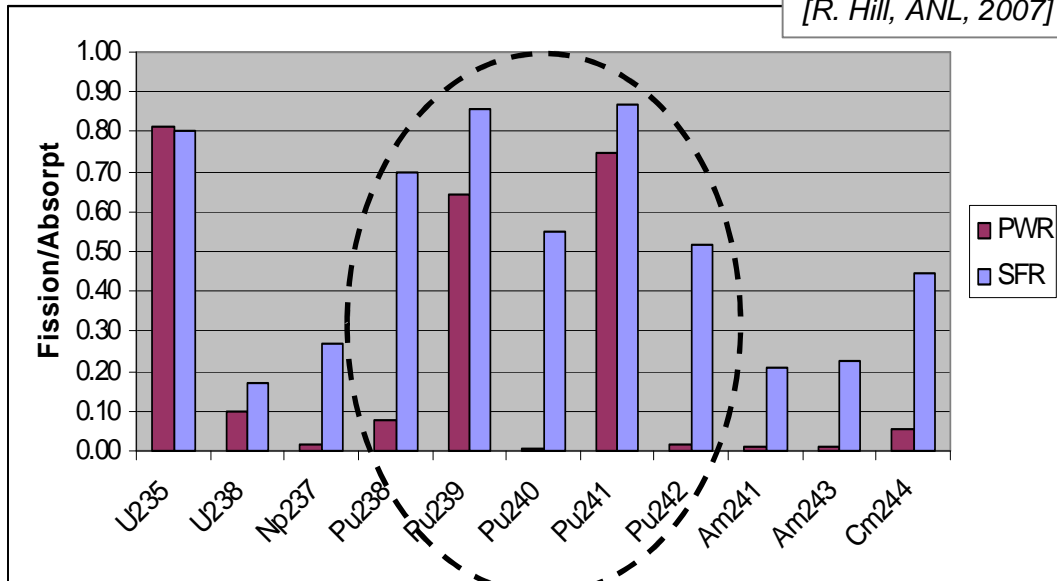


- UOX utilisé :
2013 : 12000 t (# stabilisé)
- MOX utilisé :
2013: 1500 tonnes (+ 120 t/an)
2035 : 4000 tonnes (# 250t Pu)
- URE utilisé :
2013 :420 t
2035 :1800 t

	<i>U appauvri</i>	<i>Pu</i>	<i>URT</i>
2013	290 000 t	50t	25 000 t
2035	450 000 t	50t	25 000t

MULTI RECYCLER LE PLUTONIUM

[R. Hill, ANL, 2007]



isotope	<u>Pu issu de UOX</u>	<u>Pu issu de MOX</u>
238	2.48	3.8
239	53.3	39.9
240	24.8	31.1
241	12.1	13.4
242	7.3	11.8

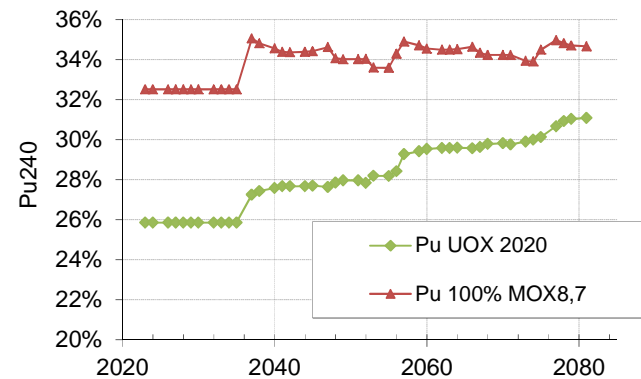
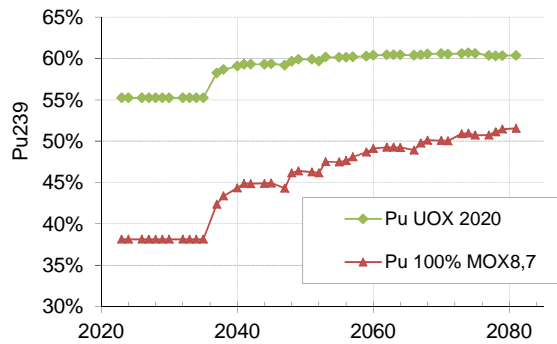
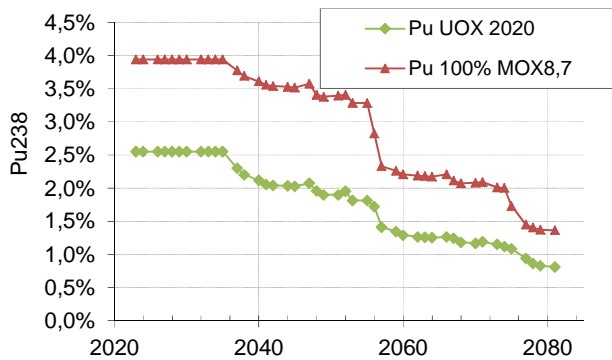
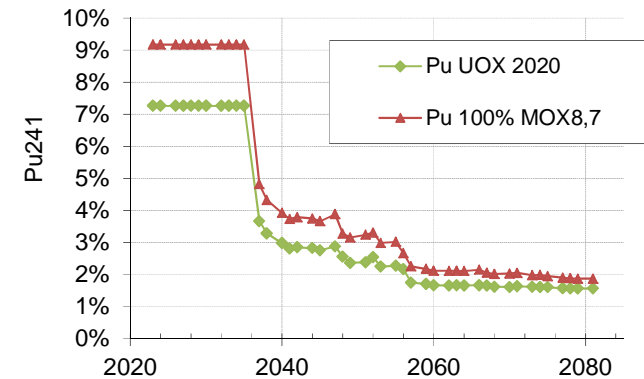
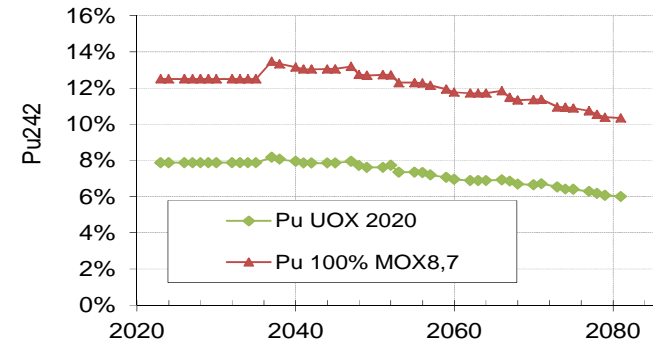
évolution Pu en REP
(BU~45 GWj/t)

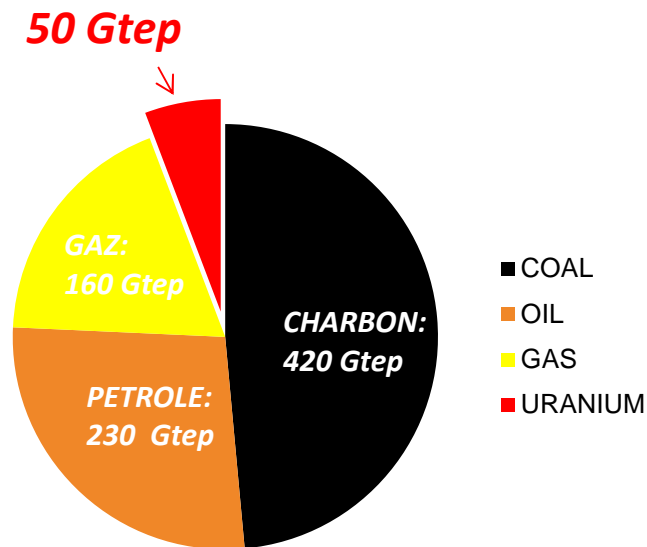
- **La qualité isotopique du plutonium est « dégradée » au fil des recyclages en REP;**
- Cela peut être compensé par un accroissement de la teneur en Pu dans le MOX;
- Mais la teneur en Pu dans le MOX ne peut dépasser de l'ordre de 12% (« effet de vidange » isotopes pairs)

MULTI-RECYCLAGE PU: L'APPORT DES RNR

évolution Pu en RNR(CFV)

composition
d'équilibre
indépendante du
vecteur Pu initial





**Uranium utilisé dans les réacteurs à eau
(réacteurs actuels)**

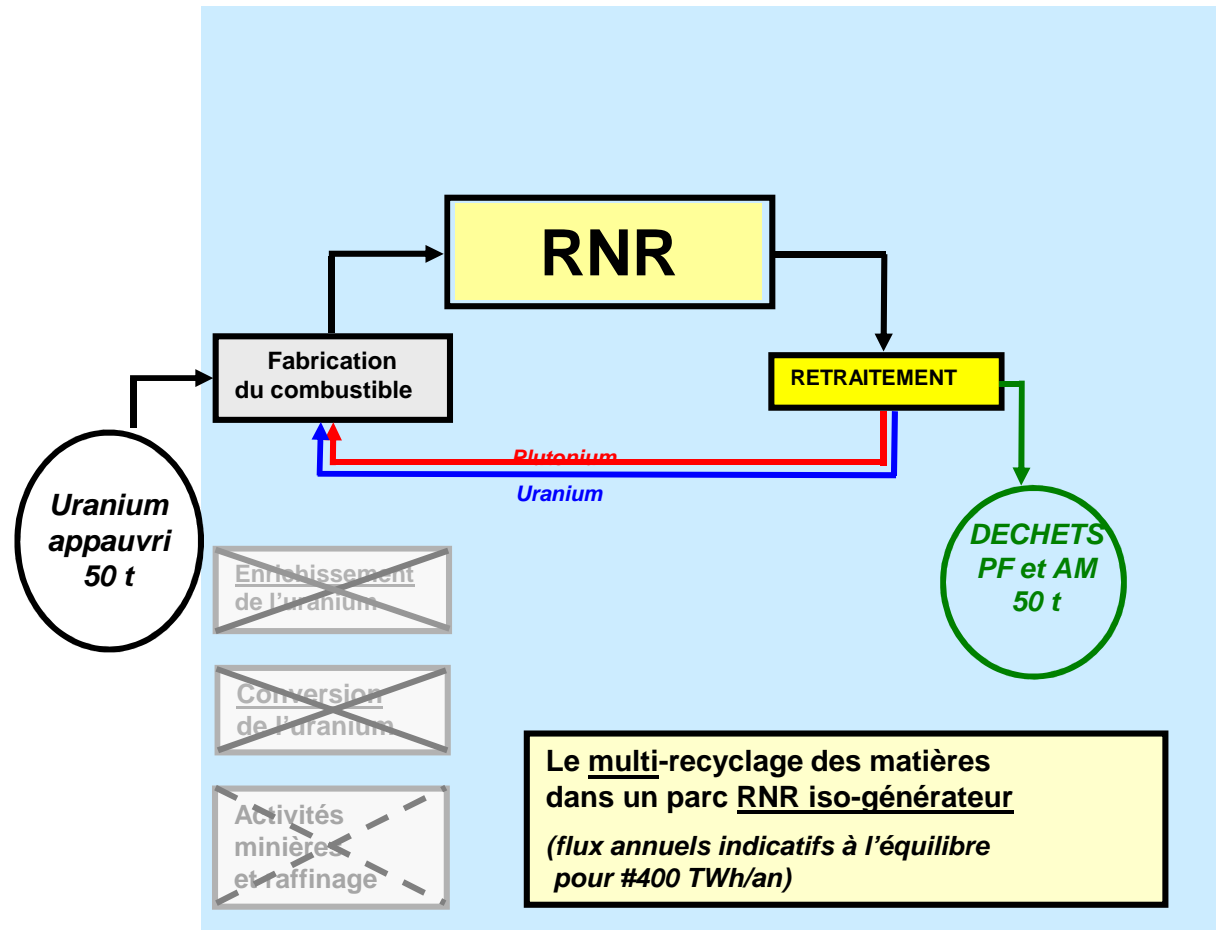
Uranium et plutonium "multirecyclés"

Ressources conventionnelles identifiées

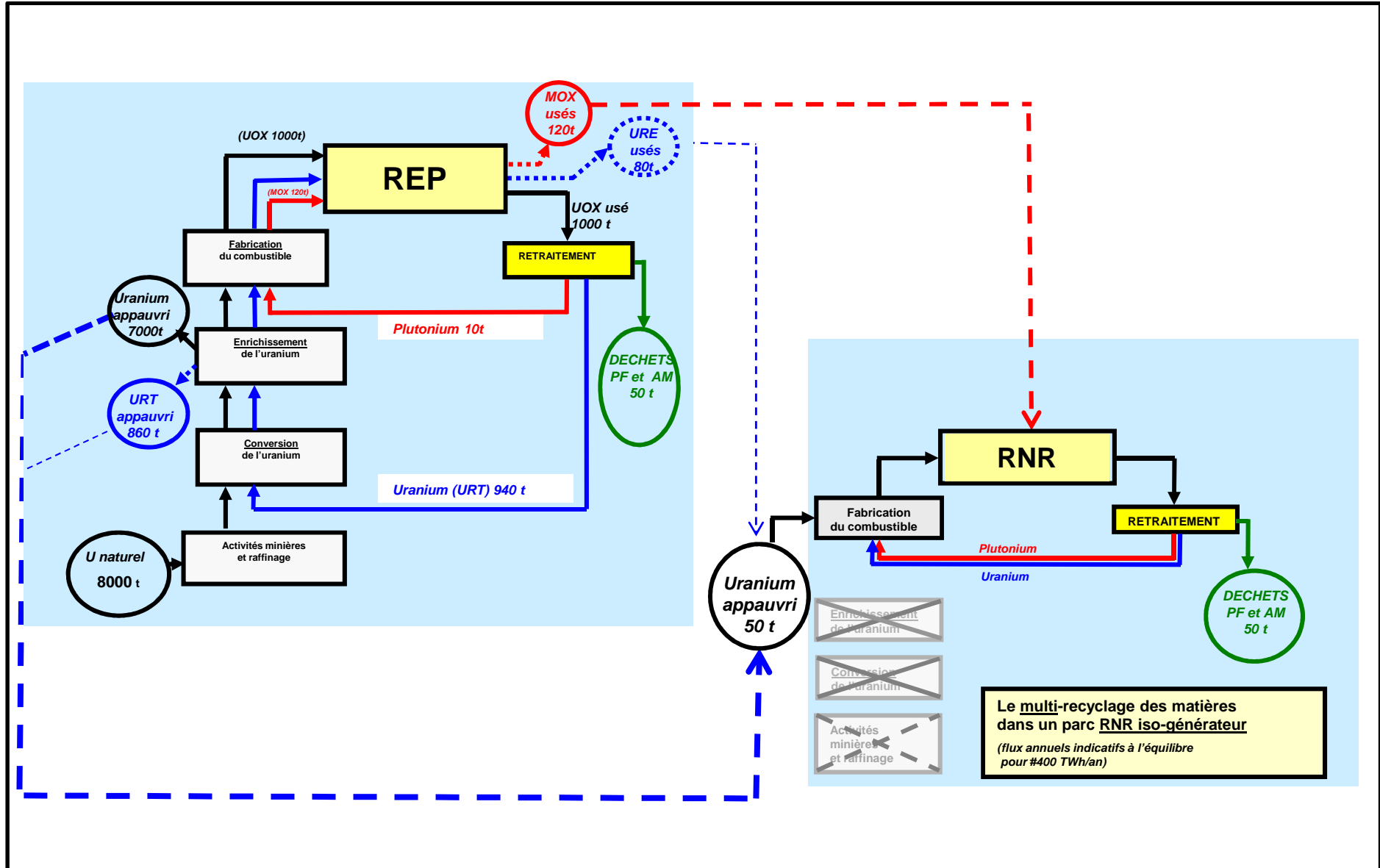
(BP statistical review, 2013 and NEA, 2012)

(OIL 235 Gt, COAL 860Gt, GAS 187 Tm³, URANIUM 4Mt)

UN PARC DE RNR ?



UN PARC DE RNR ?





ETUDE DE « SCENARIOS »

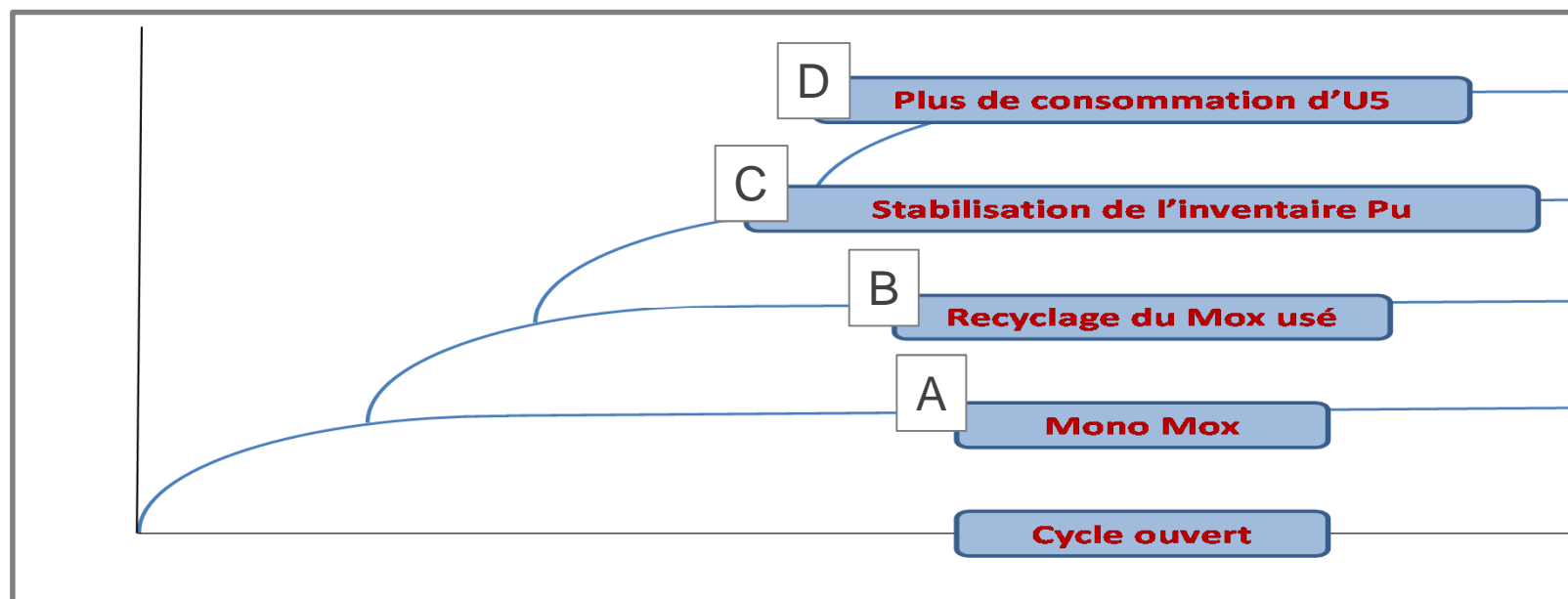
OBJET : *Etudes de scénarios de déploiement de systèmes RNR dans le parc français*

HYPOTHESES DE TRAVAIL

- *production électronucléaire constante*

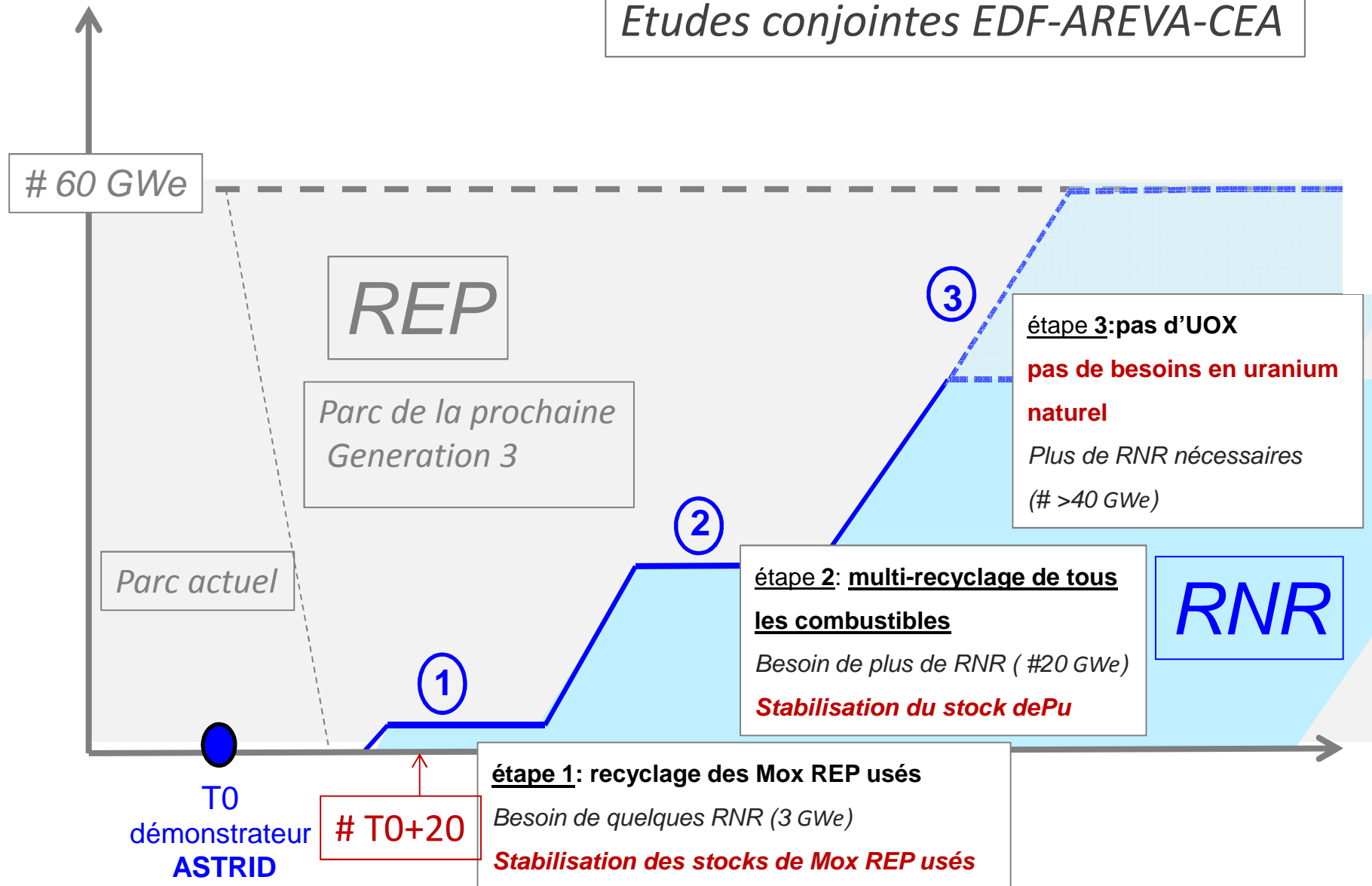
IDENTIFICATION DE « PALIERS »

- *d'ambition croissante (proportion RNR croissante dans le parc)*



LES ETUDES DE SCÉNARIOS D'INTRODUCTION DES RNR

Etudes conjointes EDF-AREVA-CEA



RESULTATS : (1) DONNEES CARACTERISTIQUES

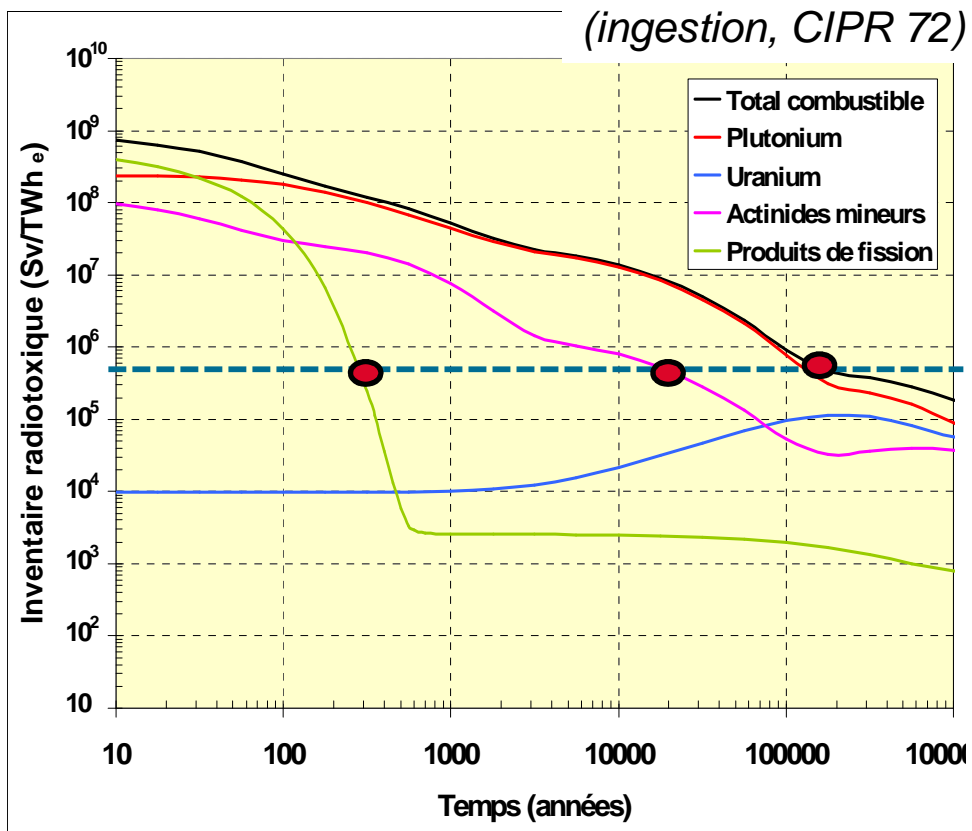
	CYCLE OUVERT	MONO-RECYCLAGE	BI-RECYCLAGE	MULTIRECYCLAGE
	REP	REP	REP-RNR(5%)	RNR
FRACTION RNR (puissance installée)	0	0	5%	100%
CONSOMMATION U NATUREL (tonnes/an)	7600 t/an	6300 t/an	5800 t/an	0
PRODUCTION U APPAUVRI (0.2%) (tonnes/an)	+ 6600 t/an	+ 5500 t/an	+ 5000 t/an	0
PRODUCTION NETTE Pu (t/an)	+10.5 t/an	+7.4 t/an	+7.1 t/an	0
PRODUCTION NETTE AM (t/an)	+ 2.5 t/an	+ 3.2 t/an	+ 3.1 t/an	+ 2.7 t/an
STOCK COMBUSTIBLES USES (tonnes/an)	+960 t/an (UOX)	+160 t/an (MOX-REP URE)	+100 t/an (MOX-RNR URE)	0

	CYCLE OUVERT REP	MONO-RECYCLAGE REP	BI-RECYCLAGE REP-RNR(5%)	MULTIRECYCLAGE RNR	MULTIRECYCLAGE RNR Transmutation Am
EMPRISE ALVEOLES HAVL (m ² /TWh) (*)	490	150	170	170	20
EMPRISE POTENTIELLE COMBUSTIBLES NON RECYCLES (m ² /TWh) (*)	0	180	120	0	0
EVALUATION GLOBALE EMPRISE HAVL (m ² /TWh) (*)	490	330	290	170	20

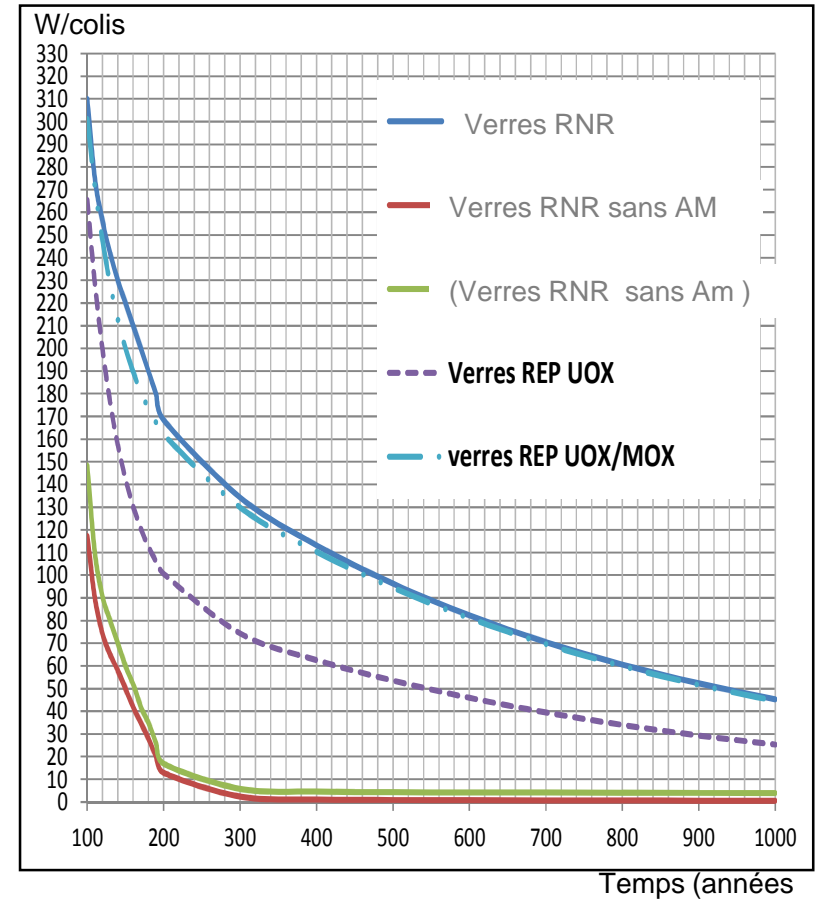
(*) TWh du parc considéré

Source: rapports Andra 2005 et 2012; étude CEA-Andra 2012
 Nouveau concept à l'étude par Andra: emprises plus élevées (de 30% à 80% selon colis)

SEPARER LES ACTINIDES MINEURS ?



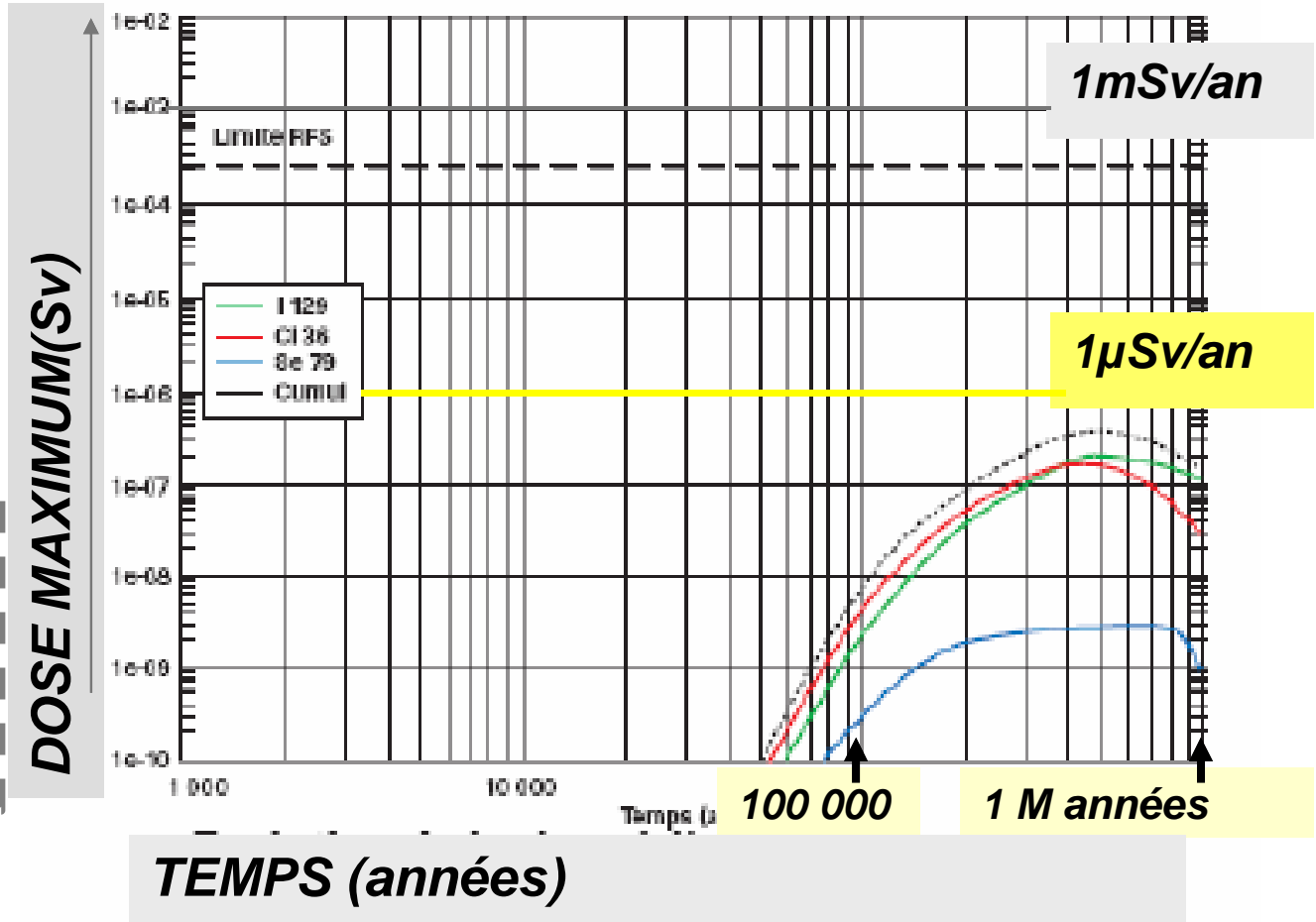
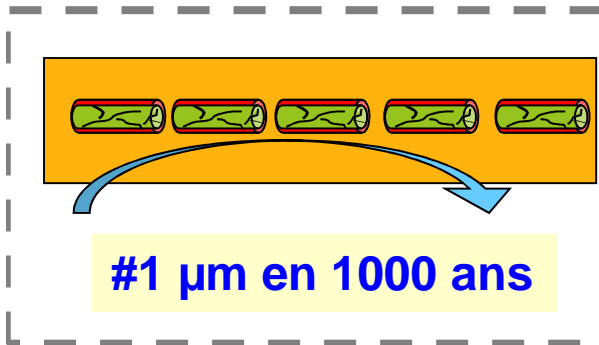
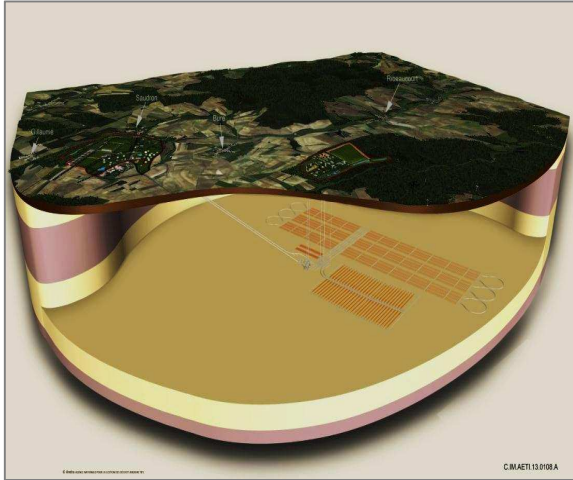
« Contenu radiotoxique » combustible utilisé:
 Prépondérance Pu,
 puis AM (Am) sur 100-100000 ans



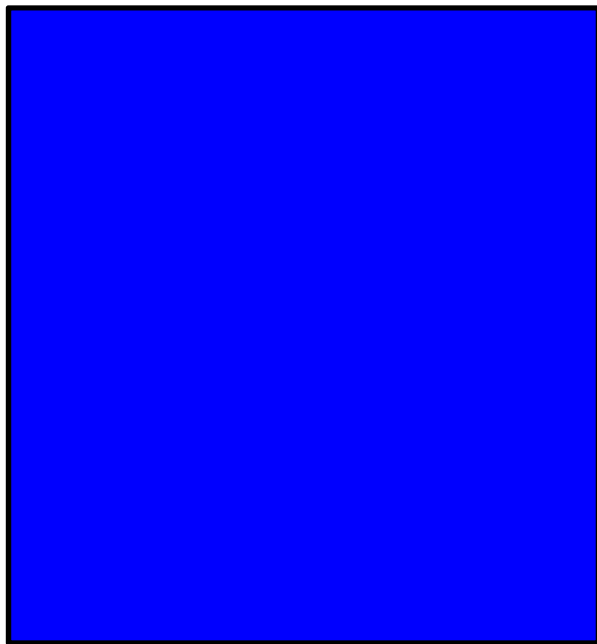
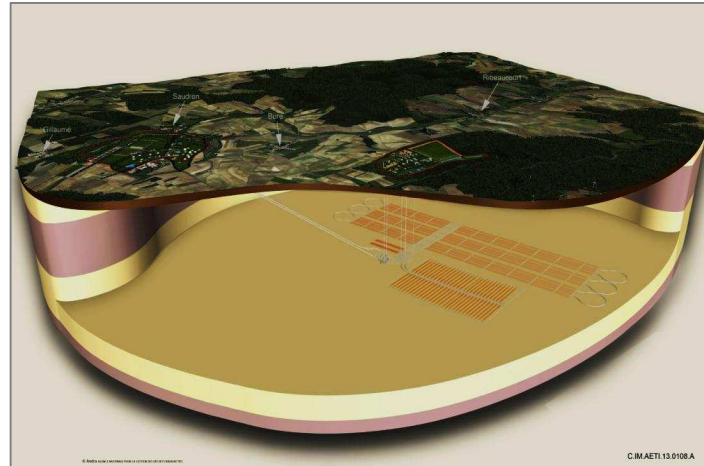
Puissance calorifique verres:
 Prépondérance Am après 1 siècle

STOCKAGE DES VERRRES

(ANDRA, « RAPPORT ARGILE », 2005)



L'EMPRISE DU STOCKAGE GEOLOGIQUE



Stockage direct CU

$1/3$



Stockage verres

$1/8$



Stockage verres sans Am

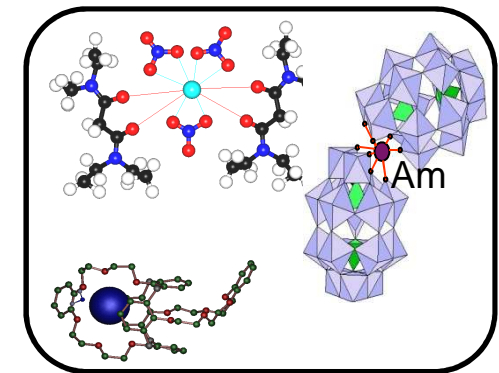
SÉPARER LES ACTINIDES MINEURS

- développement d'étapes complémentaires de traitement
(séparer AM des PF (des Ln) , séparer AM entre eux, gérer AM avec U ou Pu...)
- **de nouvelles molécules extractantes**, sélectives et résistantes
(large cadre coopératif, une recherche foisonnante)
- **des procédés** mettant en œuvre ces nouveaux extractants

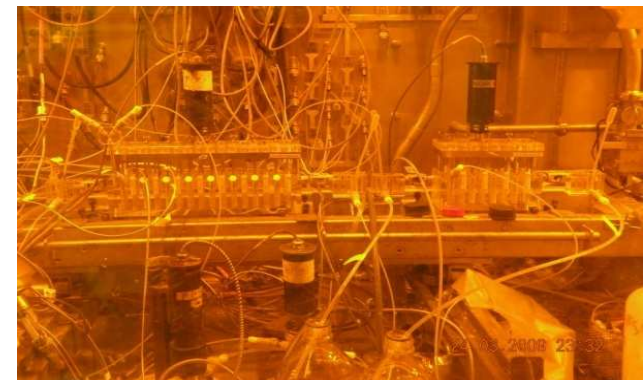
[SANEX] : Am et Cm en aval PUREX

[GANEX] : U, puis tous TRU groupés

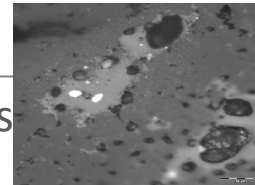
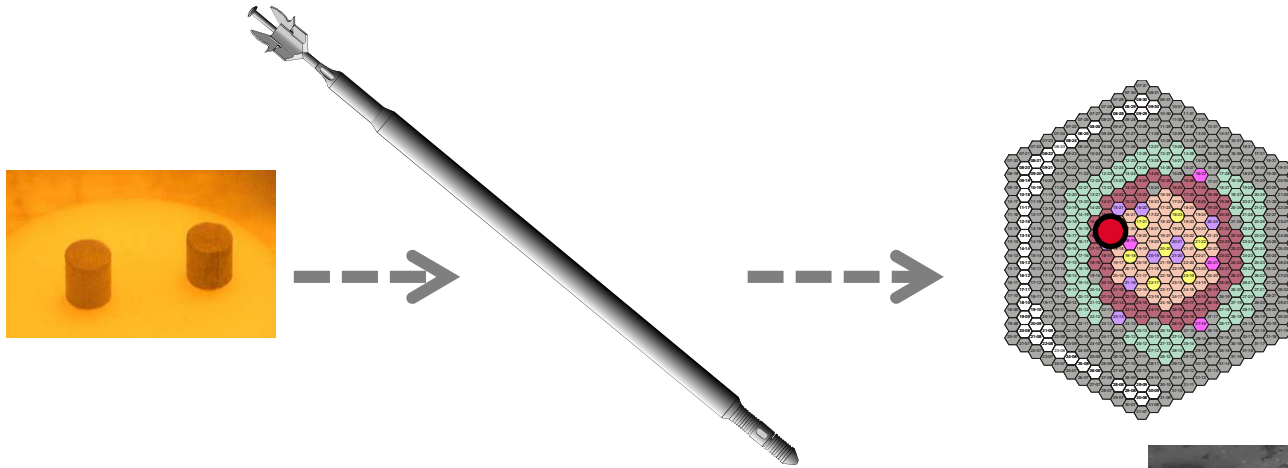
[EXAm] : Am seulement en aval PUREX



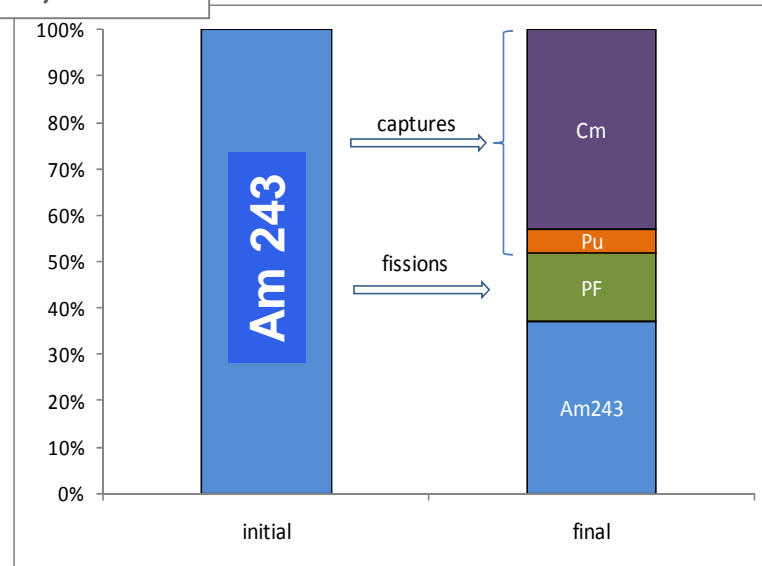
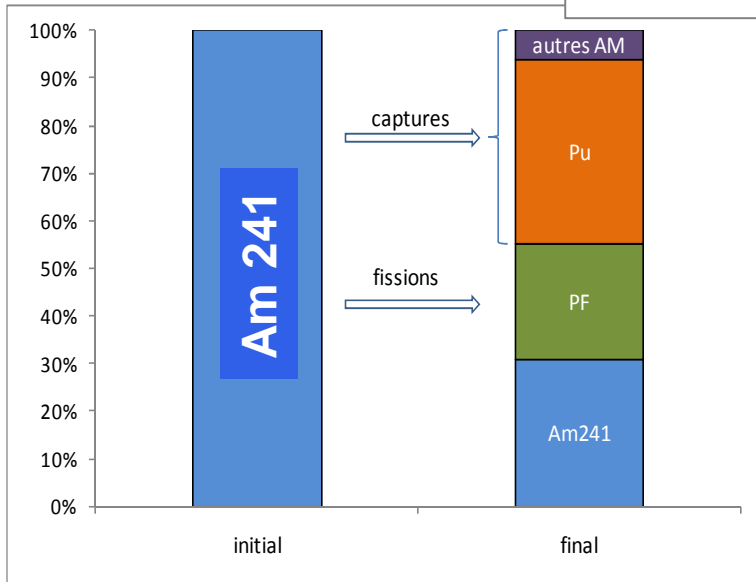
- testés dans ATALANTE
sur combustibles réels



LA TRANSMUTATION DES ACTINIDES MINEURS



(estimations après 5 années en cœur RNR)

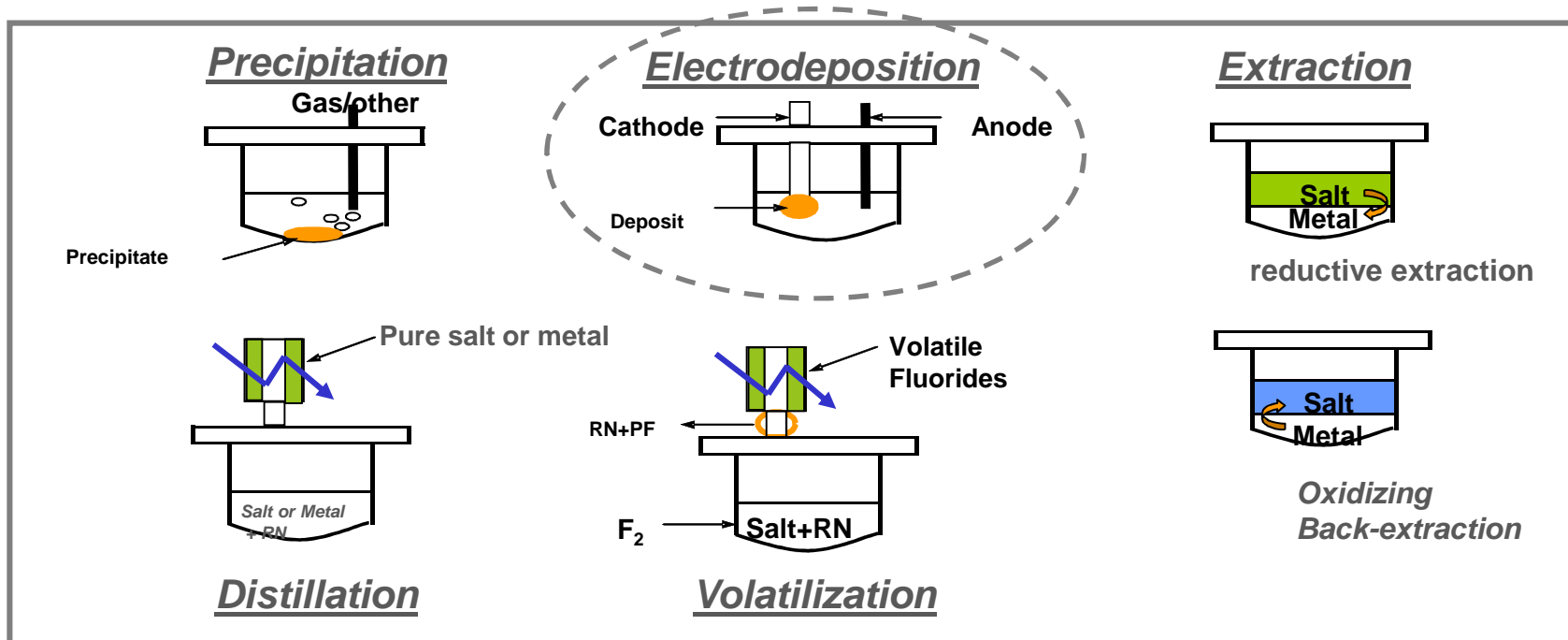


- efficacité économique des opérations
(*simplification des procédés ,compacité*)
- fiabilité et disponibilité (*alimentation des réacteurs*) ;
- flexibilité (*parc à diverses composantes*)
- sûreté et sécurité (*dont résistance/prolifération*);
- limitation de l'empreinte environnementale (*rejets*)

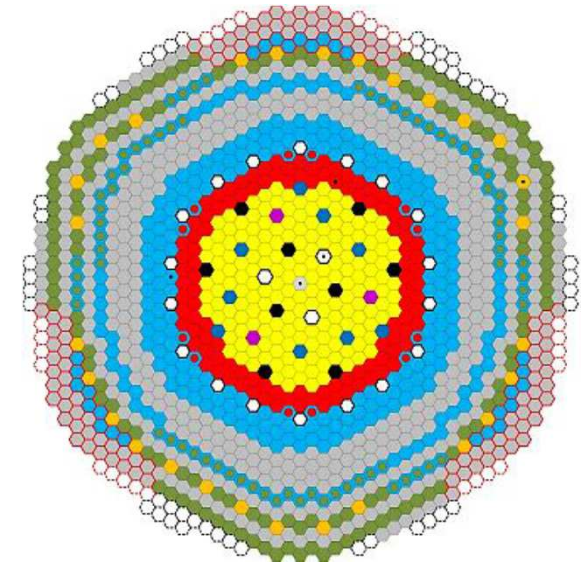
LES PROCÉDES PYROCHIMIQUES ?

pour les combustibles métalliques

- pour les combustibles oxydes ?
- des technologies diverses



- ~ 300 assemblages (CFV-V4)
- ~ 65 000 aiguilles
- ~ 4 700 000 pastilles
- ~ 25 t pastilles U_{Pu}O₂, 15 t pastilles UO₂
- 1 cœur ~ 5 tonnes de Pu



Sommier -1471 positions disponibles

- Positions non débitantes
- ⬡ 1 assemblage inerte → RBx
- 180 combustibles internes
- 108 combustibles externes
- 9 RBC
- 9 RBD
- 344 Réflecteurs
- 550 PNL
- 144 positions de SI
- 28 positions de déverminage

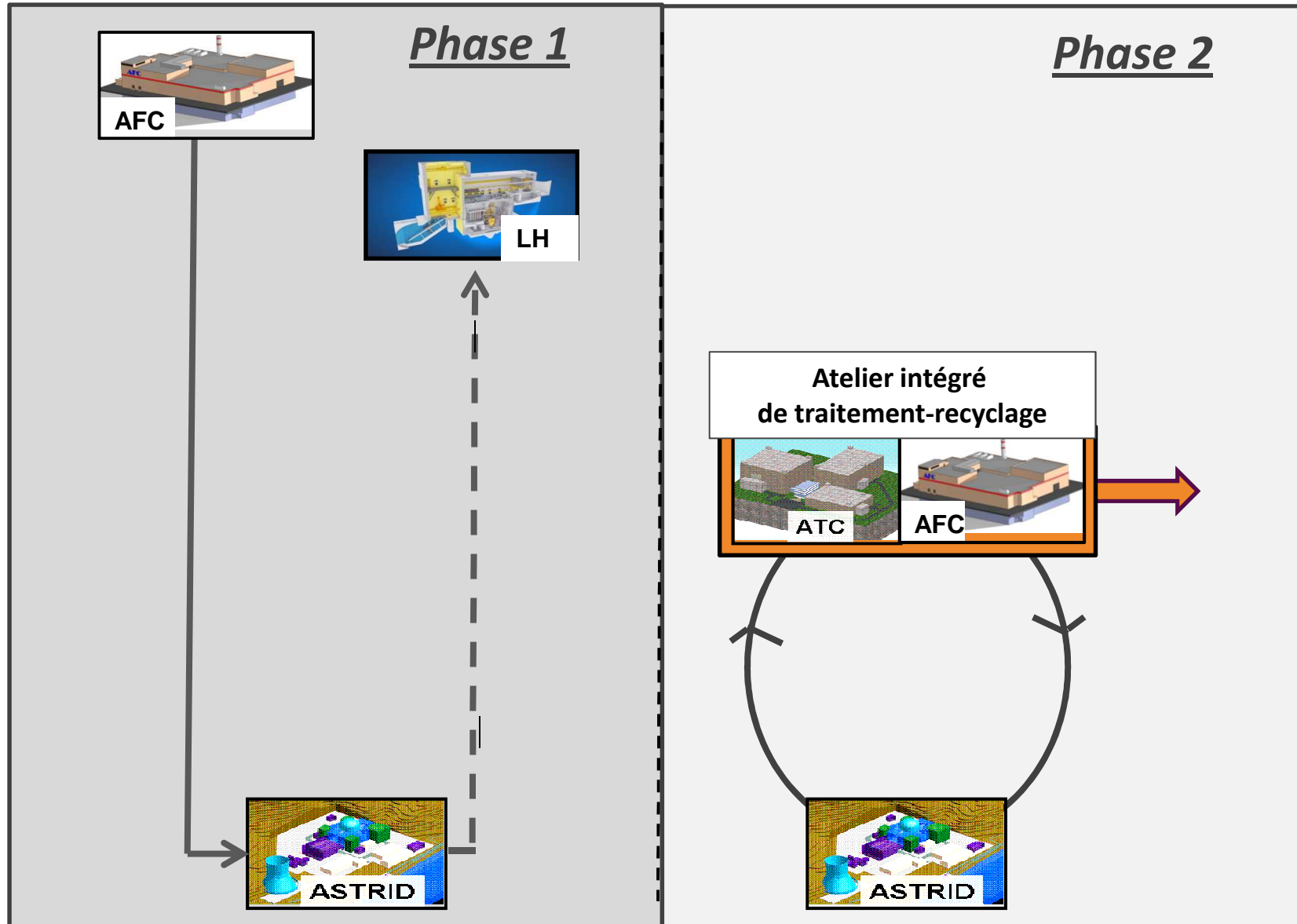
Dispositif Complémentaire de Sûreté

- 3 RBH
- 21 DCS-M-TT

Flexibilité gestion cœur

- 74 Positions libres
- 12 positions combustibles supplémentaires
- 72 positions de SI supplémentaires

UN PILOTE INTEGRE DE TRAITEMENT-FABRICATION ?



- des systèmes nucléaires durables:
des systèmes qui recyclent,
au sein de réacteurs aptes à tirer le meilleur parti des
matières
- Le MOX: des possibilités d'évolution importante,
de MOX-REP vers MOX-RNR
adaptés à une démarche progressive
- Technologies actuelles: solide base pour adaptations et
améliorations
- Autres technologies si autres combustibles ?
(autres besoins ?)