

## La gestion des déchets nucléaires

Suite ... et fin



Un seul noyau fissile dans la nature :  $^{235}\text{U}$

## PRINCIPE D'UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE:

- faire fissionner l'  $^{235}\text{U}$ .
- compétition avec la capture de n sur  $^{238}\text{U}$



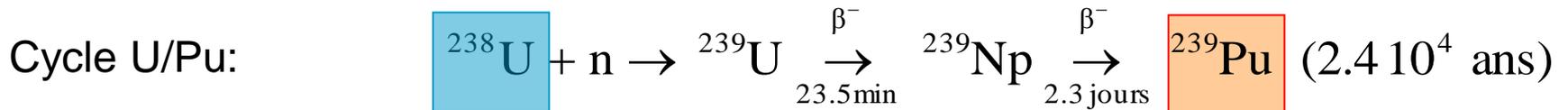
Réacteurs à Eau Pressurisé  
n lents (meV)  
U enrichi (~ 3,5% en  $^{235}\text{U}$ )

**Bilan global:** 24t d'U enrichi  $\Rightarrow$  1,116 t de noyaux lourds fissionnée

... mais reste de l'  $^{235}\text{U}$  et production de  $^{239}\text{Pu}$  et  $^{241}\text{Pu}$  qui sont fissiles  $\rightarrow$  MOX

... et 22 t d'  $^{238}\text{U}$

... les déchets (PF, AM)



Combustible UOX  
Uranium enrichi  
en  $^{235}\text{U}$



Combustible MOX (U + 7% Pu)  
20 réacteurs (900 Mwe)  
8% de puissance du parc

retraitement

### Déchets vitrifiés

- produits de fission
- actinides mineurs
- pertes U et Pu (0,1%)

### Déchets produits:

actinides mineurs: Np, Am, Pu  
produits de fission

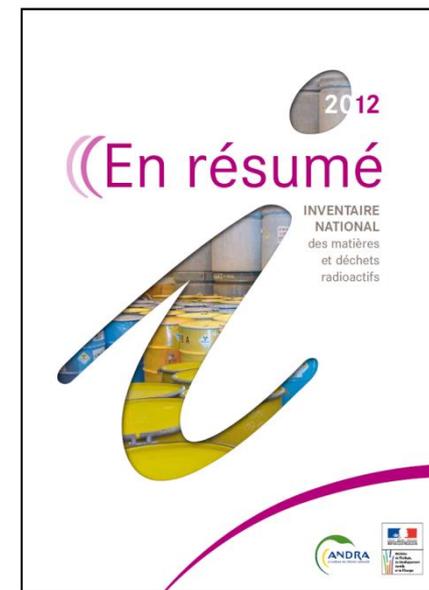
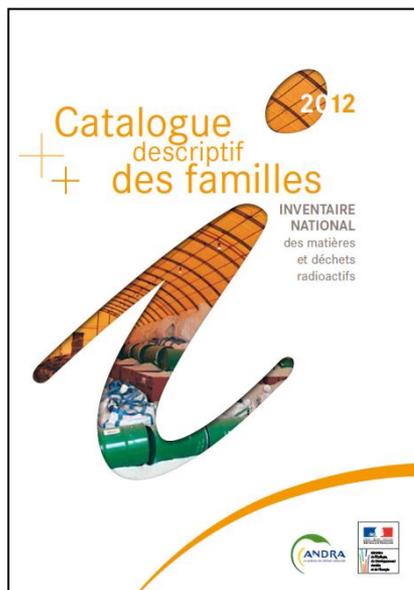
Entreposage U et Pu  
Possibilité de multirecyclage

Recyclage du Pu

## LOI DE PROGRAMME 2006 – 739 DU 28/06/2006 (ARTICLE 5) RELATIVE À LA GESTION DURABLE DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

- « Les **DÉCHETS RADIOACTIFS** sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée
    - le Pu
    - les combustibles usés (qui contient du Pu !)
    - l'Uranium appauvri
- ne sont pas considérés  
comme des déchets
- **ÉTUDE DE 2 PISTES :**
    - Séparation/transmutation des déchets HA-MA VL
    - Stockage géologique profond réversible = solution de référence
  - Demande à l'ASN un  
**PLAN NATIONAL DE GESTION DES MATIÈRES ET DÉCHETS NUCLÉAIRES (PNGMDR)**  
mis à jours tous les 3 ans

Créé par le PNGMDR en 2006. Révision tous les 3 ans



<http://www.andra.fr>

## Décret 2008-357 du 16 Avril 2008 + inventaire national des déchets radioactifs

Activité	Période	Très courte durée de vie $T_{1/2} < 100$ jours	Courte durée de vie $T_{1/2} \leq 31$ ans	Longue durée de vie $T_{1/2} > 31$ ans
<b>Très Faible Activité (TFA)</b> < 100 Bq/g		Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis élimination dans les filières conventionnelles.	Stockage de surface (< 200m) (Centre de stockage TFA de Morvilliers - Aube)	
<b>Faible Activité (FA)</b> < 5 mSv/h au contact 100 < ... < 100 000 Bq/g			Stockage en surface (< 200m) (Centre de Stockage FMA de la Manche)	(radifères et graphites) Stockage à faible profondeur à l'étude (loi du 28 Juin 2006)
<b>Moyenne Activité (MA)</b> 5 mSv/h - 2mSv/h au contact $10^5 < \dots < 10^8$ Bq/g			(Déchets tritiés à l'étude)	Stockage profond à l'étude (loi du 28 Juin 2006)
<b>Haute Activité (HA)</b> 2mSv/h au contact $\sim 10^{10}$ Bq/g			Stockage géologique profond à l'étude (loi du 28 Juin 2006)	

**Stockage à faible profondeur:** entre la surface et 200m

**Stockage profond:** à plus de 200m de profondeur.

Un projet de stockage est en cours d'étude à 500m de profondeur

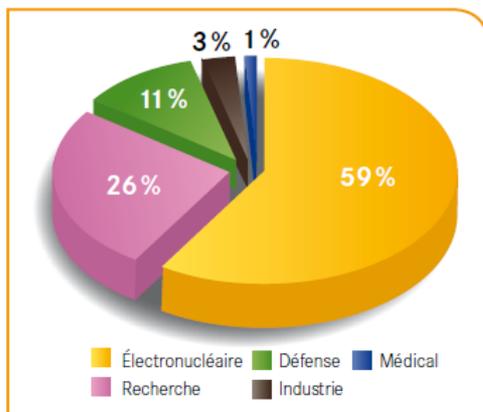
# Quantités de déchets radioactifs

Catégorie	Volume (m <sup>3</sup> équivalent conditionné) Fin 2010	Ecart 2010/2007 (m <sup>3</sup> équivalent conditionné)
HA	2 700	400
MA-VL	41 000	- 800
FA-VL	87 000	4 500
FMA-VC	830 000	37 000
TFA	360 000	130 000
Total	~ 1 320 000	~ 171 000

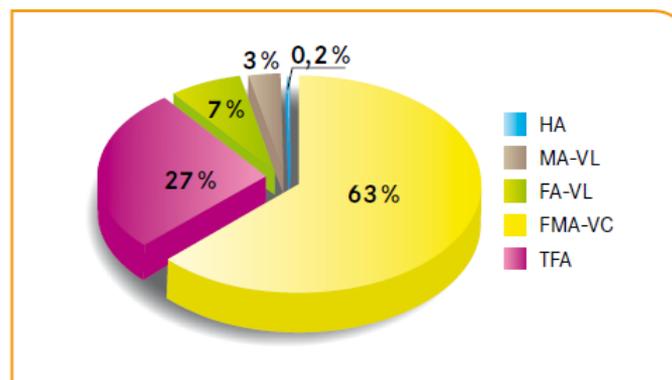
Conditionnement optimisé  
Meilleure caractérisation



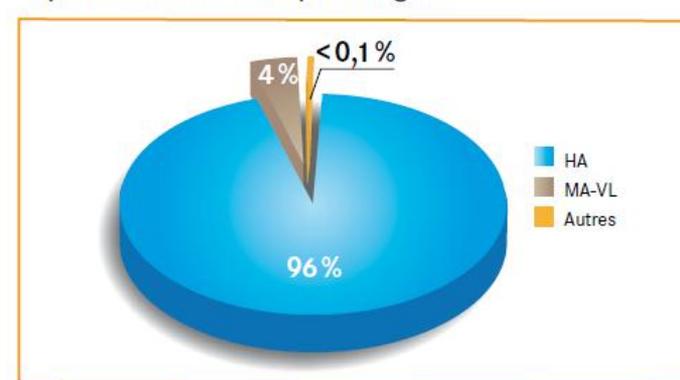
Répartition du volume total de déchets par secteur économique



Répartition en volume par catégorie de déchets



Répartition de l'activité par catégorie



## Aujourd'hui

- Gestion par décroissance (vies courtes)
- Stockage en surface
- Entreposage

## A l'étude

- Solution de référence:  
stockage géologique profond (HA et MA-VL)
- Séparation/transmutation (actinides mineurs)

## Le contexte politique international

### International



- **améliorer la sûreté nucléaire,**
- **améliorer la résistance à la prolifération,**
- **minimiser les déchets,**
- **optimiser l'utilisation des ressources naturelles,**
- **diminuer les coûts de construction et d'exploitation des réacteurs.**

→ **France: les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium**

- Gestion à long terme des déchets radioactifs
- Protection de l'homme et de son environnement
  - Émission de radioactivité
  - Dissémination de matière radioactive

⇒ **isoler les matières radioactives le temps nécessaire à leur décroissance**

 **Nécessité de maîtriser**

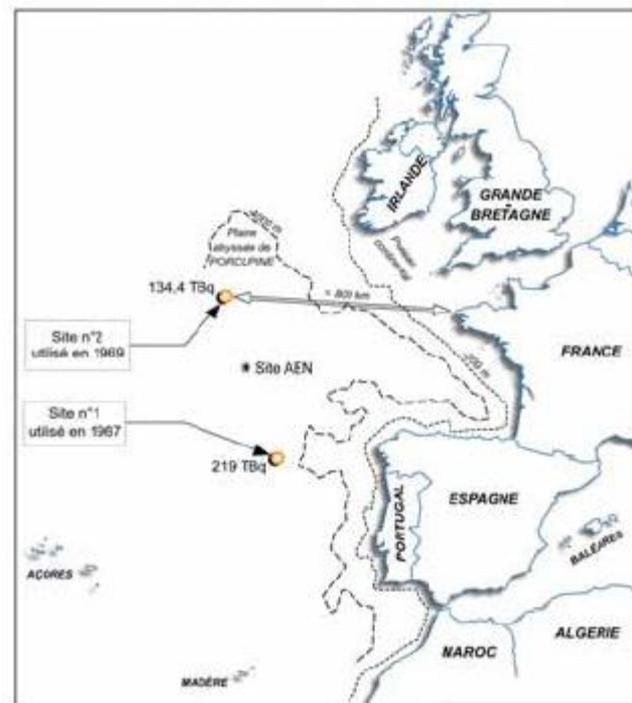
- Production
- Conditionnement
- Stockage définitif

 **dépend de la nature des déchets**

- Radioactivité
- Propriétés thermiques
- Mobilité (nature chimique)

En France, le stockage (et recherches liées) sous la responsabilité de l'ANDRA  
Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs

<http://www.andra.fr>



2 campagnes françaises d'immersion en **Atlantique**:  
(1967 et 1969)

Entre 4000 et 5000 m de fond  
46 396 colis (**FMA**), soit 14 200 tonnes  
Activité totale:  $353 \cdot 10^{12}$ Bq (dont 8 en  $\alpha$ )

À comparer à la zone utilisée par l'AEN (1971-1982):  
123 000 colis, 150 000 tonnes  
Activité totale:  $42 \cdot 10^{15}$  TBq en  $\alpha$

... Et dans le **Pacifique**  
(1967 - 1982)  
2000 -3000m de fond  
11 600 colis  
3 200 tonnes  
23 TBq en  $\alpha$   
0.7 Bq en  $\beta$  et  $\gamma$

**Déchets TFA:** filière spécifique unique  
(sauf Espagne)

→ le Centre de Stockage de Morvilliers  
(Aube); 28 ha

mise en service depuis Aout 2003.



capacité: 650 000 m<sup>3</sup>

quantité stockée fin 2007: 89 331 m<sup>3</sup>



**Déchets FMA:**

centre de la Manche: phase de surveillance

centre de Soulaire (Aube): phase d'exploitation

→ Accueil 90% des volumes annuels

capacité : 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>

quantités stockées fin 2007: 208 053 m<sup>3</sup>

## PROVENANCE

- laboratoires de recherche
- activités médicales et industrielles
- gants, filtres, résines, ...

Quelques types  
de colis:



Coque béton de résines



Fût métallique de déchets cimentés



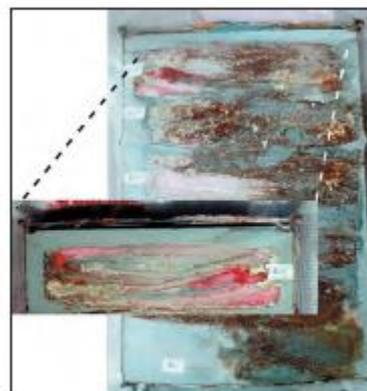
Colis contenant des protections  
neutroniques



Radiographie d'un colis



Coupe d'un colis  
pour contrôle



Découpe d'un colis de déchets  
compactés et cimentés pour contrôle



Entreposage des protections  
neutroniques

**RADIFÈRES:** essentiellement  $^{226}\text{Ra}$  (décroissance de  $^{238}\text{U}$ ),  $^{222}\text{Rn}$

**GRAPHITES:**  $^{14}\text{C}$ ,  $^{63}\text{Ni}$  (VL) et  $^3\text{H}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{55}\text{Fe}$  (VL),  $^{36}\text{Cl}$

Loi du 28 Juin 2006  
et PNGMDR

## OBJECTIFS INSCRITS DANS LA LOI DU 28 JUIN 2006

- Demande d'autorisation de création (2013-2014)
- Mise en service du stockage (2019-2020)

## CHOIX DES 2 OU 3 SITES D'INVESTIGATION DÉBUT 2009

- Mission confiée à l'Andra en juin 2008 : lancer un appel à candidatures des collectivités locales
- Annonce des sites d'investigation par le MEEDAAT (Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire) en janvier 2009
- **Juillet 2009 : retrait des candidatures des communes sélectionnées**

## PNGMDR 2010-2012 ...

- poursuite de recherche de site
- Elaboration des projets de territoire
- Fin 2012:

Andra remet un rapport-bilan sur les études menées

Andra propose des scénarios de gestion possible des déchets FA-VL.



**Recherche de site**

**DÉCHET MAVL:** (~ 41 737 m<sup>3</sup> en 2007)

- Coques, embouts de combustibles irradiés,
- Démantèlement d'installations nucléaires



**Ceci n'est pas un déchet  
c'est une matière valorisable !**



Conteneur de déchets compactés CSD-C



Combustible utilisé:  
~ 1000 t / an

**DÉCHET HA:** (2 203 m<sup>3</sup> en 2007)

- retraitement des combustibles irradiés



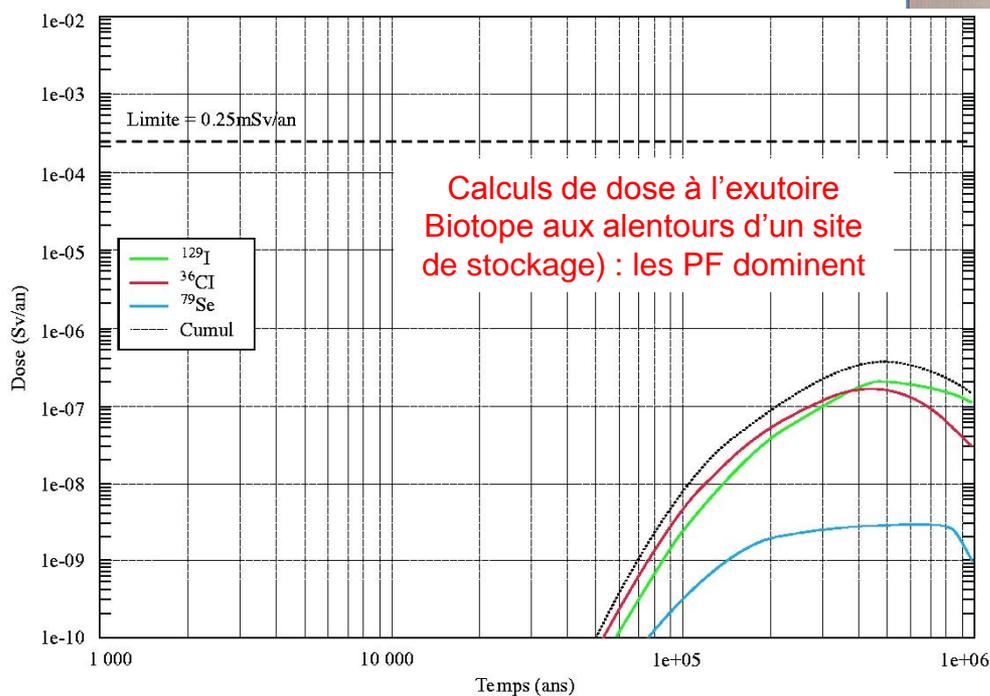
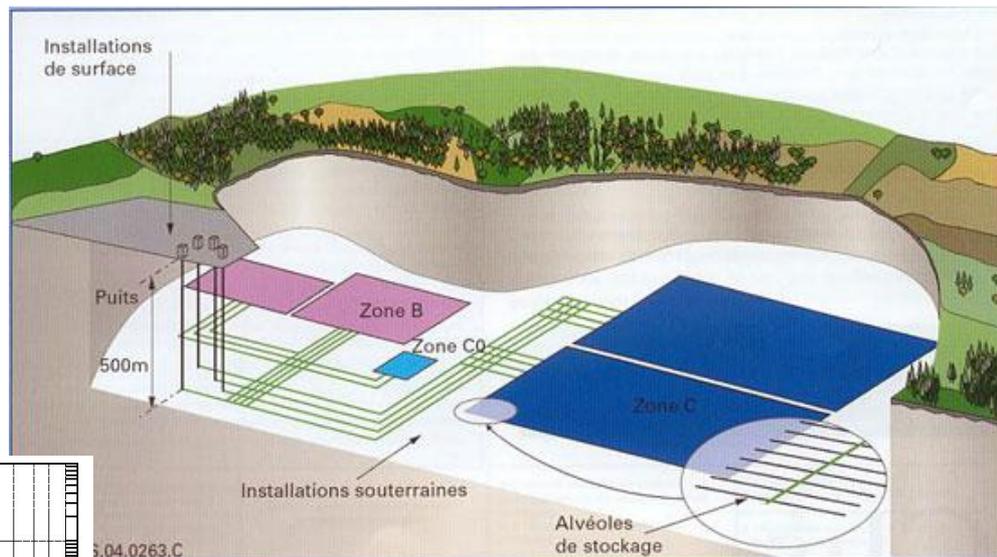
Cisailage, retraitement, puis  
**Vitrification**  
(usine de la Hague)



Conteneur de déchets vitrifiés CSD-V  
(150 litres)  
Stockage/Entreposage

Vitrification considérée comme irréversible

→ Stockage géologique profond

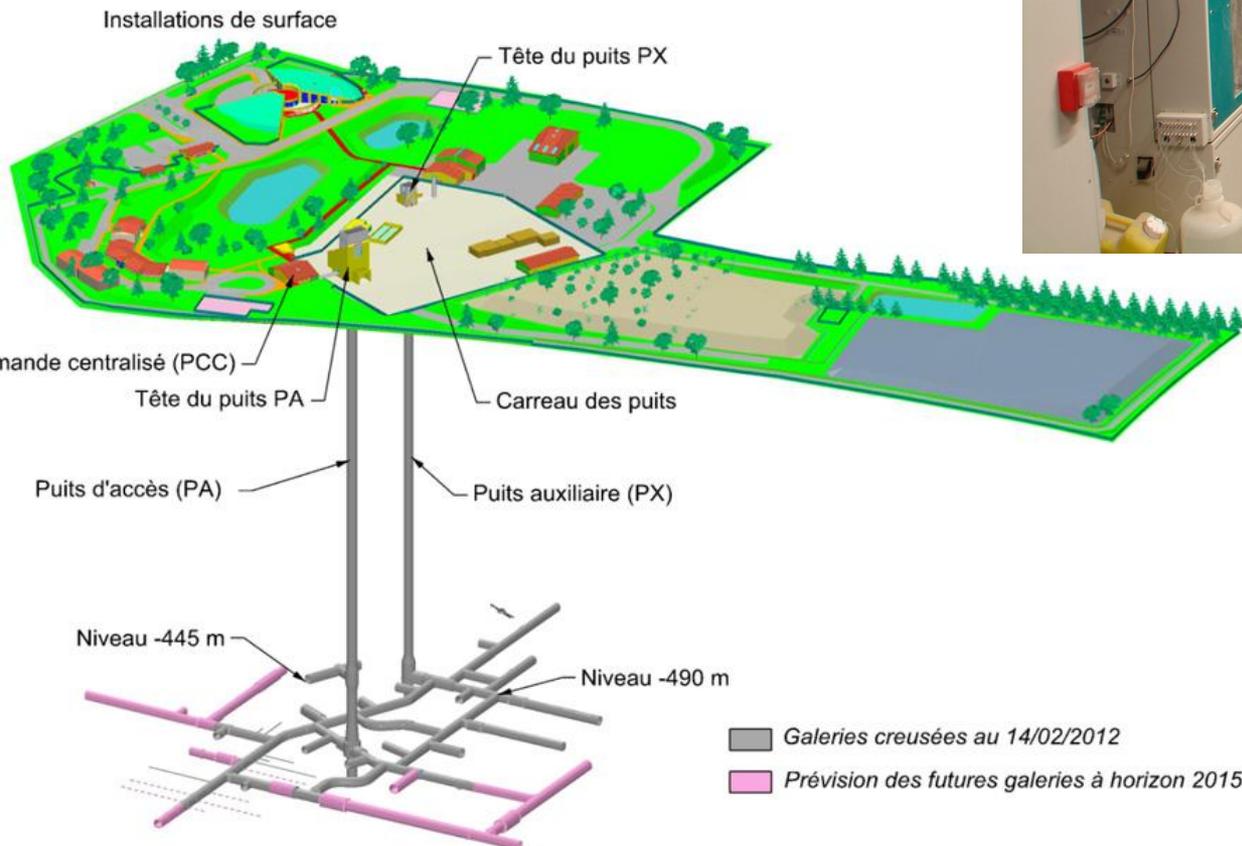


Migration des déchets vers la biosphère:

- un processus très lent
- dose à l'exutoire  
    << radioactivité naturelle

© Andra – dossier 2005

- Site argileux
- Recherches depuis 1994
- Le Laboratoire de Bure ne sera pas le centre de stockage



© Andra



Février 2000



## PHASE 1: 1992 - 2005

reconnaissance 15 M€, développement 220 M€, expérimentations 90 M€

- 27 forages profonds
- 40 m de galerie à 445 m
- 485 m de galeries à 490 m
- 130 forages depuis les galeries expérimentales
- 1400 capteurs reliés au SAGD en temps réel
- 4 km de carottes dans le Callovo-Oxfordien
- 40000 échantillons

## PHASE 2: 2008-2012

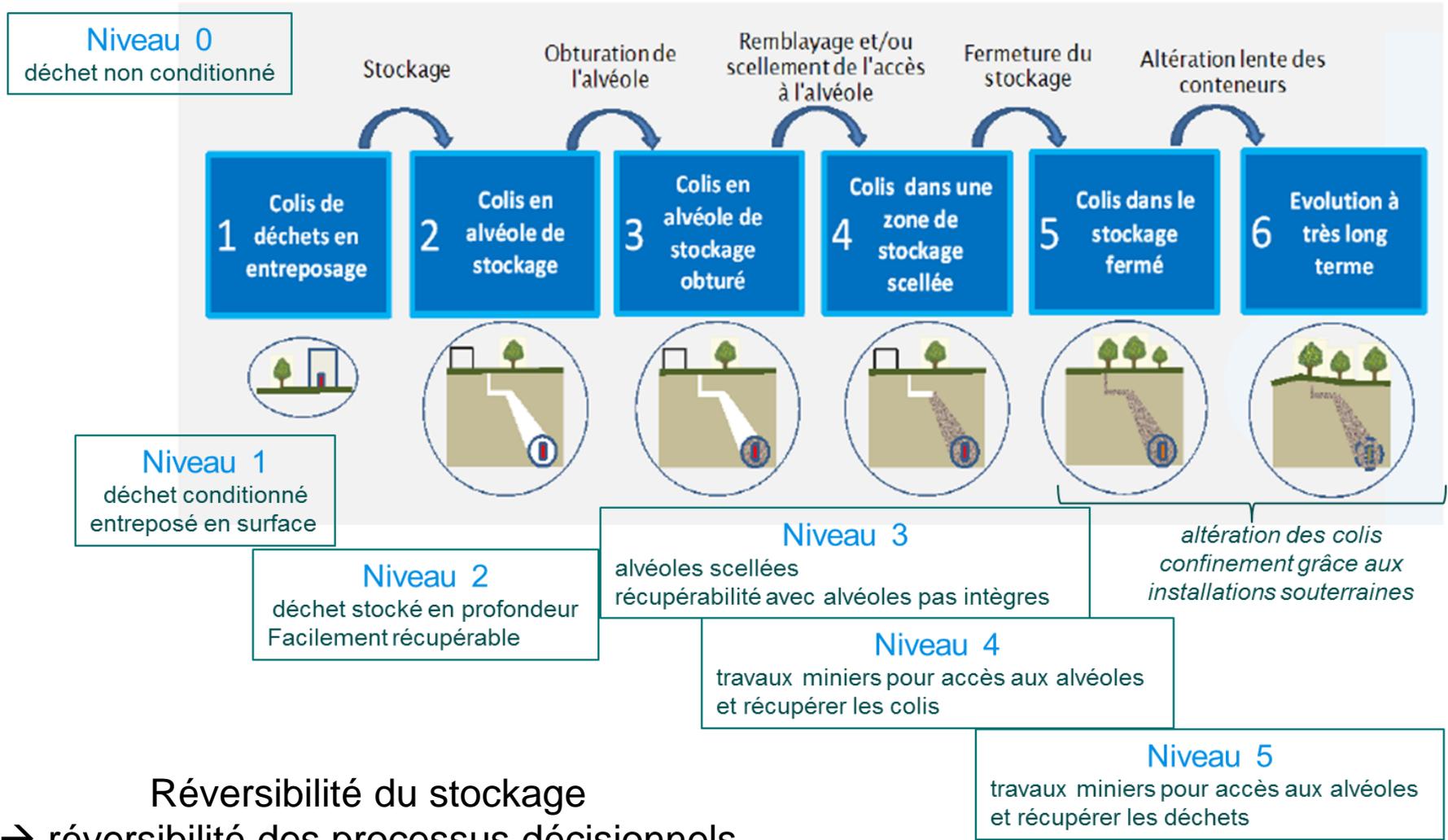
Coûts d'exploitation: 17 M€/an

- 800 m de galeries supplémentaires
- 25 expérimentations à démarrer ou poursuivre
- 230 forages à réaliser pour la période 2007-2009
- 2000 capteurs à installer
- 14 forages profonds pour la reconnaissance 2008-2009

## LOI DU 28 JUIN 2006 – ARTICLE 12

« l'autorisation de création d'un centre de stockage en couche géologique profonde de déchets radioactifs ne garantissant pas la **réversibilité** de ce centre dans les conditions prévues par cette loi ne peut être délivrée. »

« L'autorisation fixe la durée minimale pendant laquelle, à titre de précaution, la réversibilité du stockage doit être assurée. **Cette durée ne peut être inférieure à cent ans.** »



## RECYCLER DES NOYAUX EN RÉACTEUR POUR LES FAIRE DISPARAÎTRE PAR RÉACTION NUCLÉAIRE

### Les transuraniens (TRU)

Formés par capture neutronique et décroissance radioactive  
→ les éliminer par **fission**

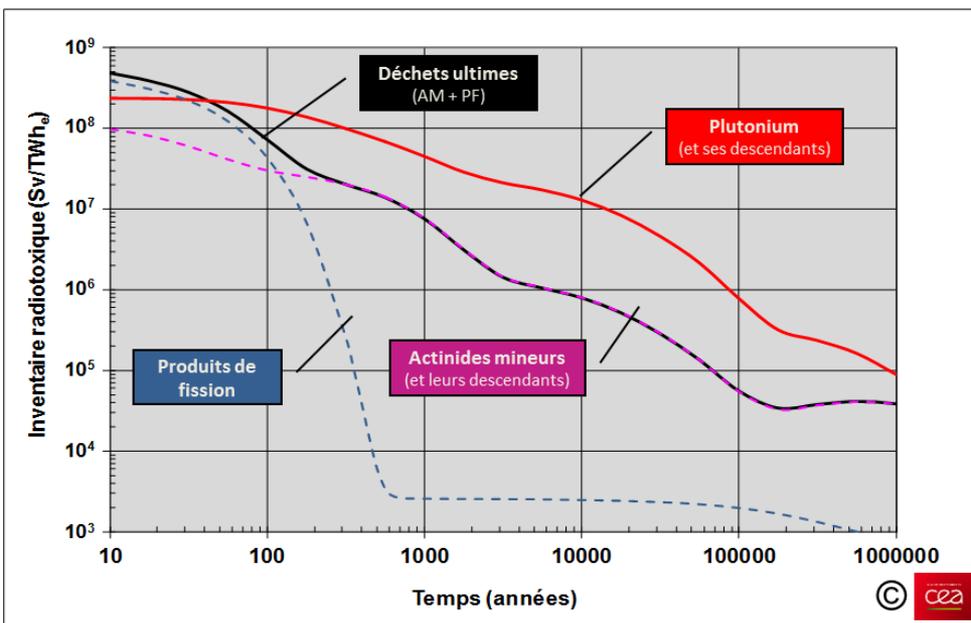
### Les produits de fission à vie longue (PF-VL)

Formés par fission, puis décroissance ( $\beta$ ) et/ou capture neutronique  
→ les éliminer par **capture** vers un isotope stable

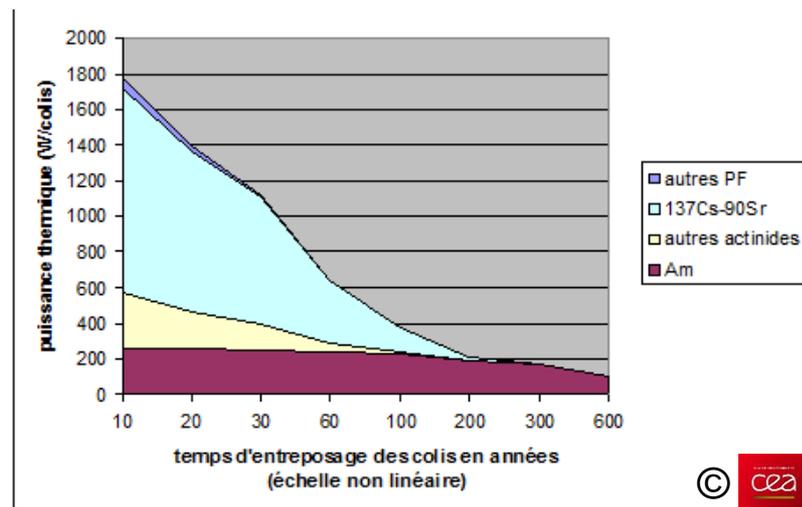
Rappel: loi de 2006

la transmutation ne se positionne qu'en option complémentaire d'un stockage

- **RÉDUCTION DE LA CHARGE THERMIQUE**
  - transmuter les PF → entreposage 100 ans
  - transmuter l'Am



Evolution dans le temps de l'inventaire de radiotoxicité des différents composants d'un combustible usé (UOX 45 GWj/t)



Puissance thermique résiduelle des colis HA produits par le traitement de combustibles UOX (85%) + MOX (30%)  
 Refroidissement UOX: 5 ans, MOX: 30 ans

- **RÉDUCTION DE LA QUANTITÉ ET LA NOCIVITÉ des déchets (loi de 2006)**
  - **le Pu domine la radiotoxicité**
    - ... mais ce n'est pas un déchet !
  - transmuter les actinides mineurs (Np, Am, Cm)
    - ... **en complément du recyclage du Pu**
    - ... **qui ne migrent pas dans le stockage profond**

## Neptunium : de bonnes raisons de l'enfouir

- $T_{1/2} = 2.14 \cdot 10^6$  ans – radiotoxicité à long terme faible
- très peu mobile
- produit pendant des siècles par décroissance  $\alpha$  de  $^{241}\text{Am}$

## Américium: de bonnes raisons de l'incinérer

- principal contributeur à la radiotoxicité
- principal contributeur à la thermique séculaire des déchets

## Curium: de bonnes raisons de l'entreposer

- manipulation difficile (radioprotection, thermique)
- transmutation lente
- $^{243}\text{Cm} \xrightarrow{T_{1/2}=29 \text{ ans}} ^{239}\text{Pu}$
- $^{244}\text{Cm} \xrightarrow{T_{1/2}=18 \text{ ans}} ^{240}\text{Pu}$

**le Pu domine la radiotoxicité**



**transmuter les AM n'a de sens  
qu'accompagné d'une stratégie de  
gestion du Pu**

## SI LE NUCLÉAIRE SE DÉVELOPPE PEU

Réserves d'U suffisantes pendant plusieurs siècles

Le Pu n'est plus « précieux » → Pu = déchet; incinération possible  
(*vision américaine*)

## SI LE NUCLÉAIRE EST DÉPLOYÉ DE MANIÈRE SIGNIFICATIVE

Les filières actuelles (thermique) non soutenables (manque de matière fissile)

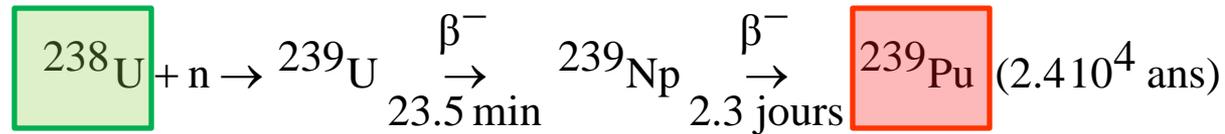
**Besoin de régénérer la matière fissile**

Pu « précieux » pour démarrer les régénérateurs  
(*vision française*)

**Les modes de transmutation  
dépendent  
des scénarios envisagés pour la suite du nucléaire**

## DIFFÉRENTES OPTIONS ENVISAGEABLES:

- transmutation en réacteur électrogène → les **RNR** (Réacteur à Neutrons Rapides)
- transmutation en réacteur dédié → les **ADS** (Accelerator Driven System)



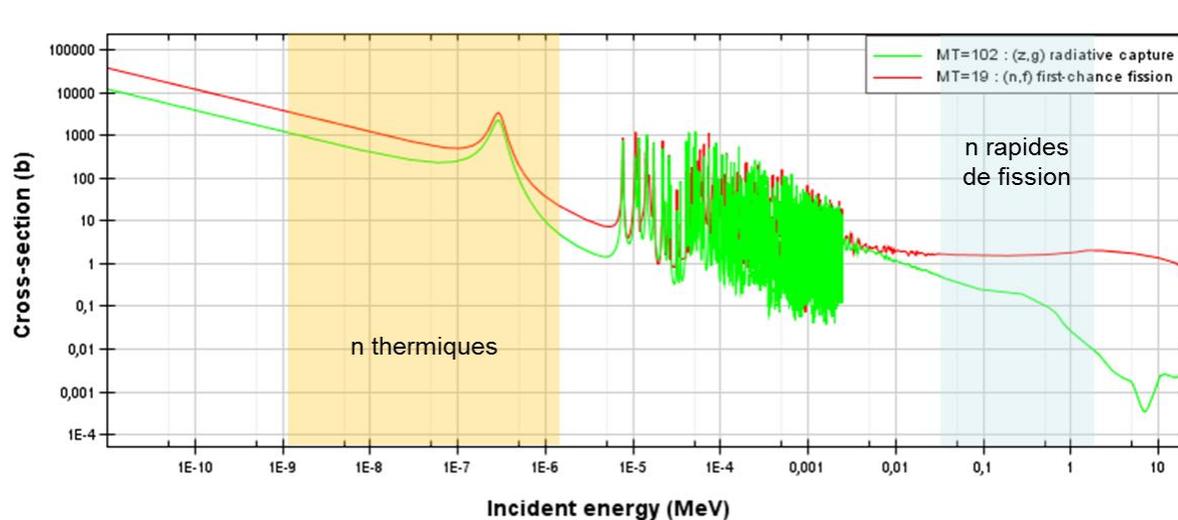
*Noyau fertile*

*Noyau fissile*

- Le Pu fissionné est régénéré par capture sur l' $^{238}\text{U}$  : **masse de Pu = cte**
- L' $^{238}\text{U}$  est consommé :  $\sim 1$  tonne / (Gwe.an)
- Utilisation du minerai d'uranium = 100%

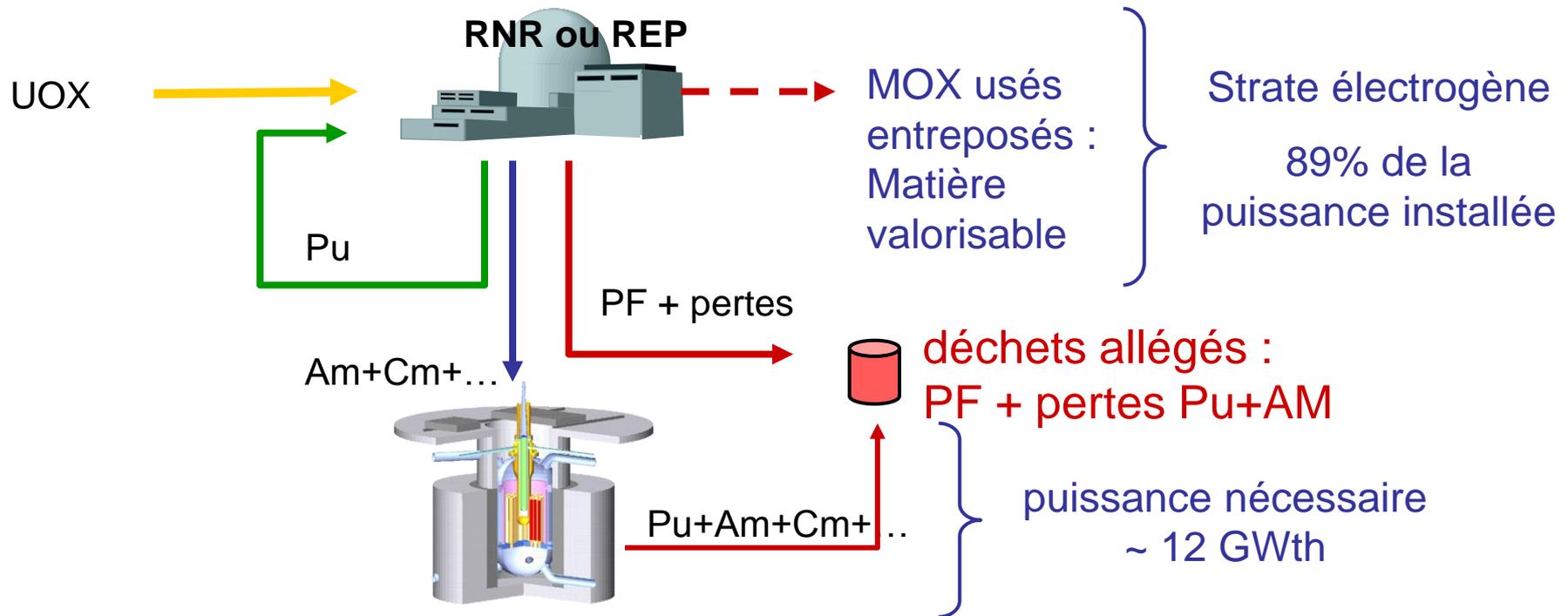


**Déploiement du nucléaire  $\Rightarrow$  Régénération  
 $\Rightarrow$  réacteur à neutrons rapides**



Séparation « nucléaire électrogène » - « gestion des déchets »

⇒ les **Accelerator Driven System**



## PRINCIPE D'UN ADS: Accelerator Driven System

Actinides mineurs : peu de neutrons retardés produits

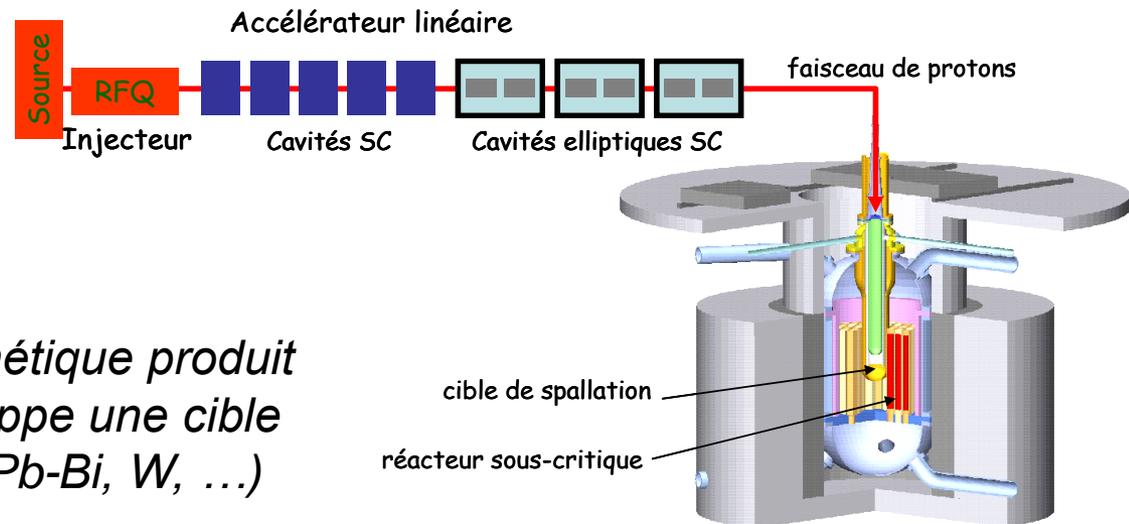
→ problème potentiel pour la sûreté du réacteur

→ utilisation d'un réacteur sous critique

→ besoin d'une source de neutrons externe pour maintenir la réaction en chaîne

→ Pilotage du réacteur par un faisceau de neutrons produit par un accélérateur

## POSSIBILITÉ DE « CHARGER » LE RÉACTEUR EN ACTINIDES MINEURS



### Réaction de spallation :

*1 proton de 1 GeV d'énergie cinétique produit environ 30 neutrons lorsqu'il frappe une cible épaisse de noyaux lourds (Pb, Pb-Bi, W, ...)*



LA CIBLE: MEGAPIE (MEGAwatt Pilot Experiment), à PSI

COUPLAGE RÉACTEUR – SOURCE DE NEUTRONS:

MUSE (MUltiplication d'une Source Externe)

VERS UNE VALIDATION EXPÉRIMENTALE « EN CONDITIONS REPRÉSENTATIVES »:

GUINEVERE

(Generator of Uninterrupted Intense Neutron at the lead VEnus REactor )

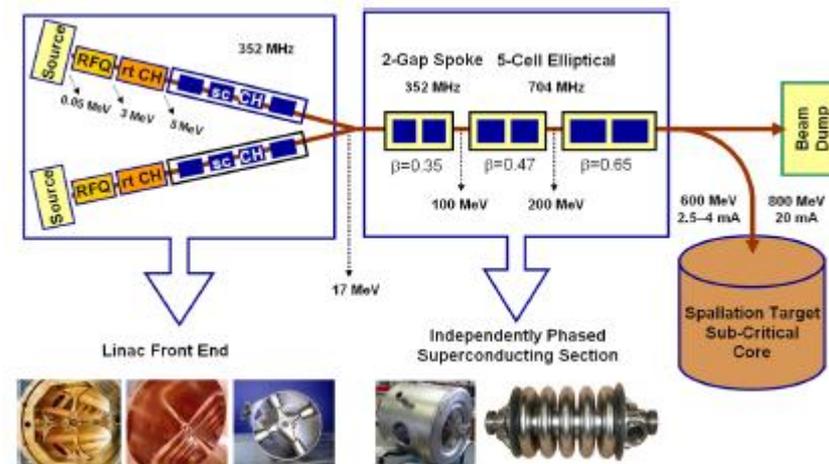
- Mesure de la réactivité du cœur,
- relation courant-puissance

Expérience en support à un démonstrateur **MYRRHA**  
Projet européen - 2023

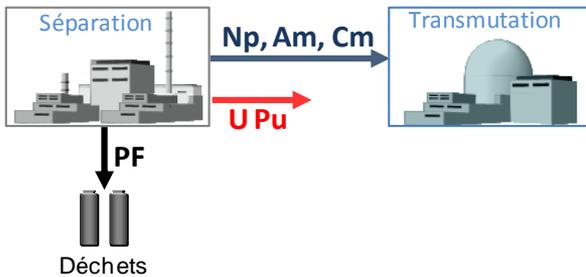
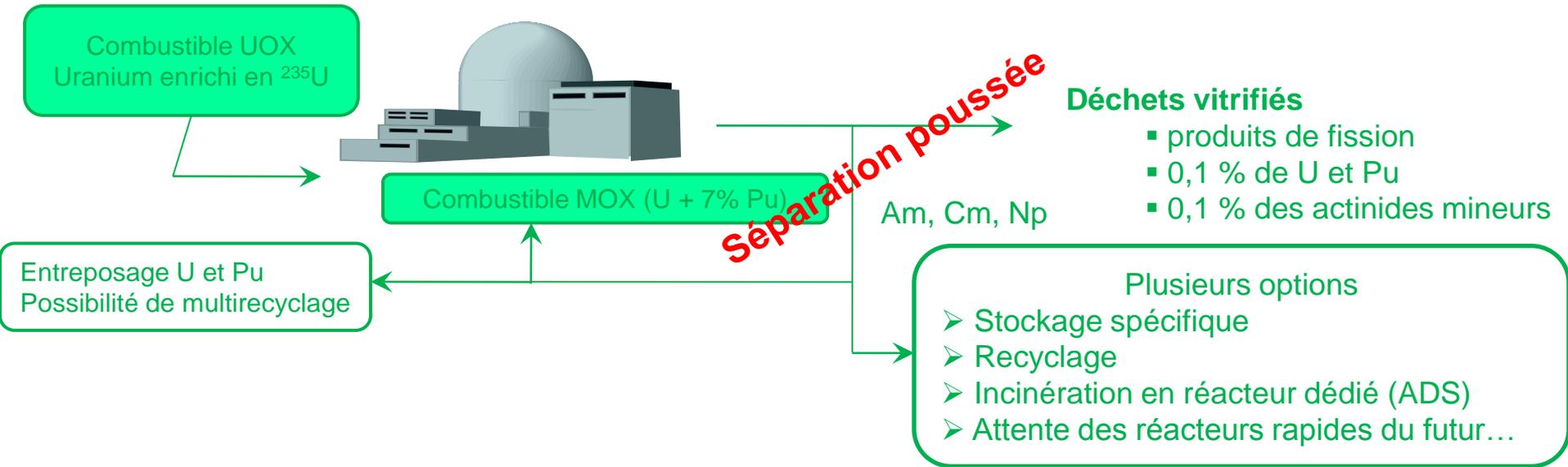
L'ACCÉLÉRATEUR:

XT-ADS (FP5), EFIT (FP6), MAX (FP7 - Myrrha Accelerator eXperiment, research and development program)

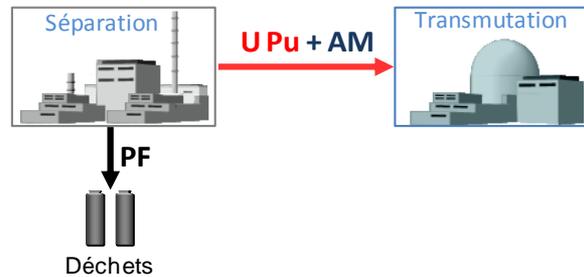
XT-ADS	EFIT	MAX - MYRRHA
2,5 – 4 mA	20 mA	4 mA
600 MeV	800 MeV	600 MeV
< 5 coupures ( $\Delta t > 1s$ ) / 3 mois	< 3 coupures ( $\Delta t > 1s$ ) / an	< 3 coupures ( $\Delta t > 3s$ ) / an



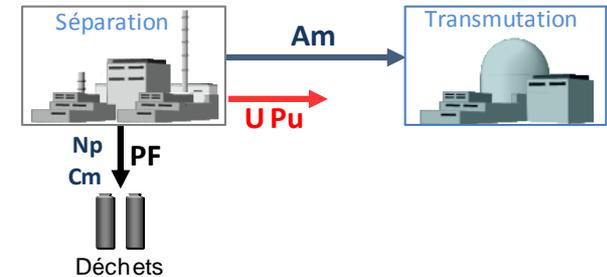
# Les options de séparation / transmutation



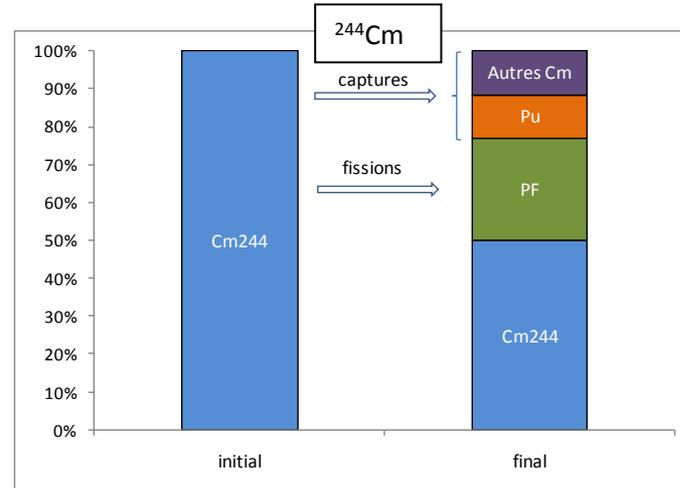
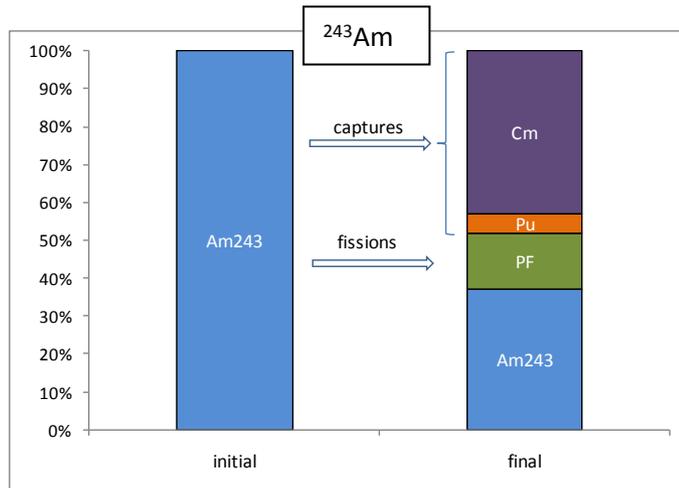
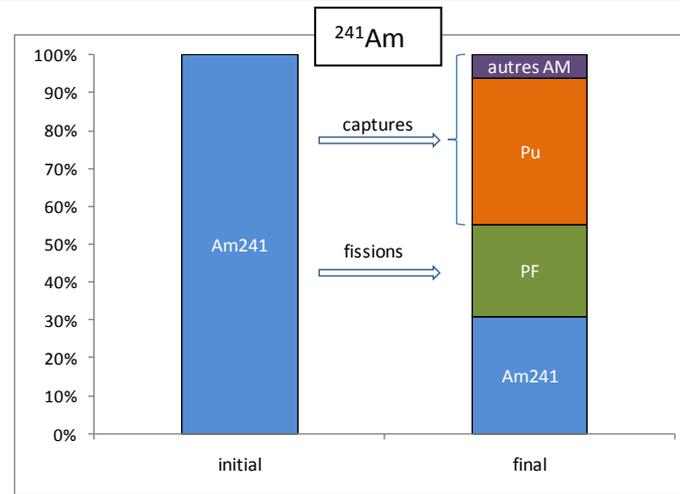
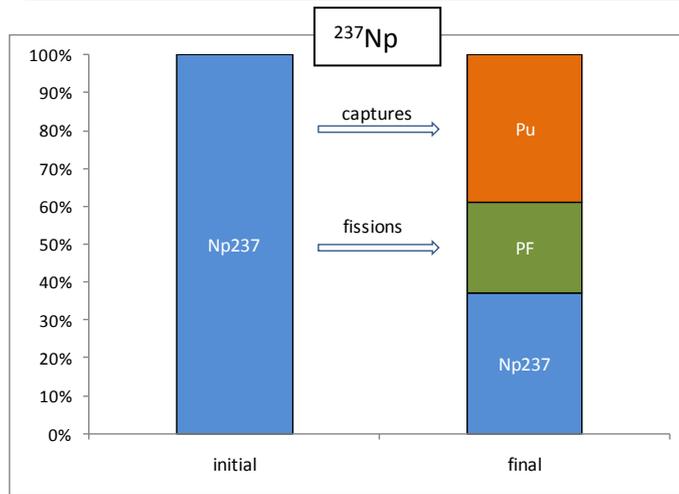
*Séparation séquentielle  
DIAMEX-SANEX*



*Séparation groupée  
GANEX*



*Séparation spécifique de l'Am  
EXAM*



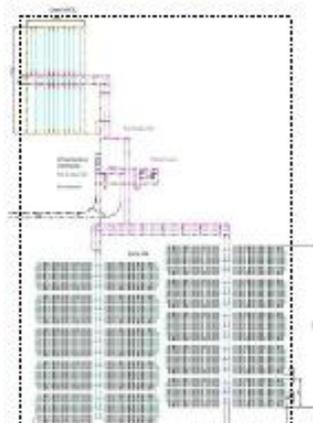
**LA TRANSMUTATION EST UN PROCESSUS LENT !**

- Taux de fission obtenu: ~ 25%
- Pas de disparition complète en une irradiation ⇒ Recyclage nécessaire

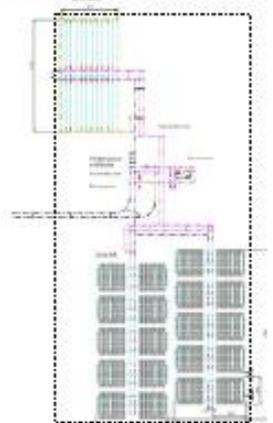
Après 70 ans d'entreposage ...

	Sans transmutation	Transmutation de l'Am seul	Transmutation de tous les actinides mineurs
Surf. tot stockage	1200 ha	770 ha	620 ha
Zone HA	510 ha 108 000 colis	280 ha 96 000 colis	210 ha 89 000 colis
Volume excavé	$4.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$3.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$3.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

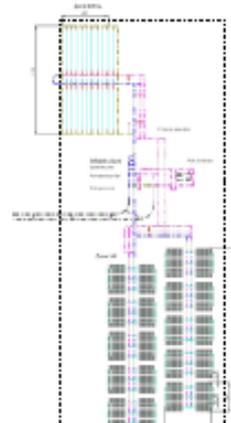
Sans transmutation  
entreposage : 70 ans



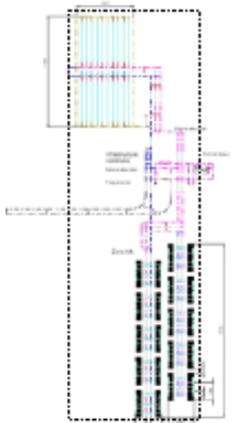
Transmutation Am seul  
entreposage : 70 ans



Transmutation AM  
entreposage : 70 ans



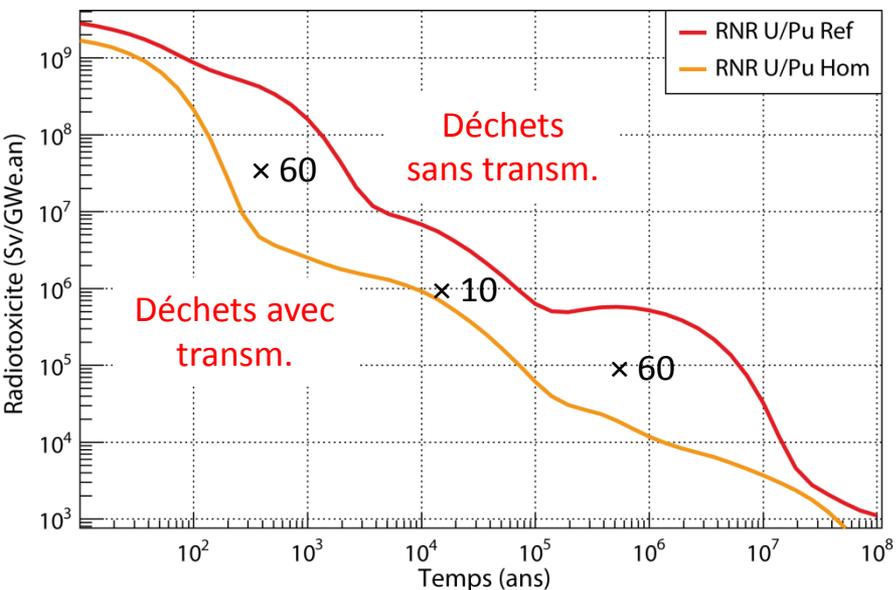
Transmutation AM  
entreposage : 120 ans



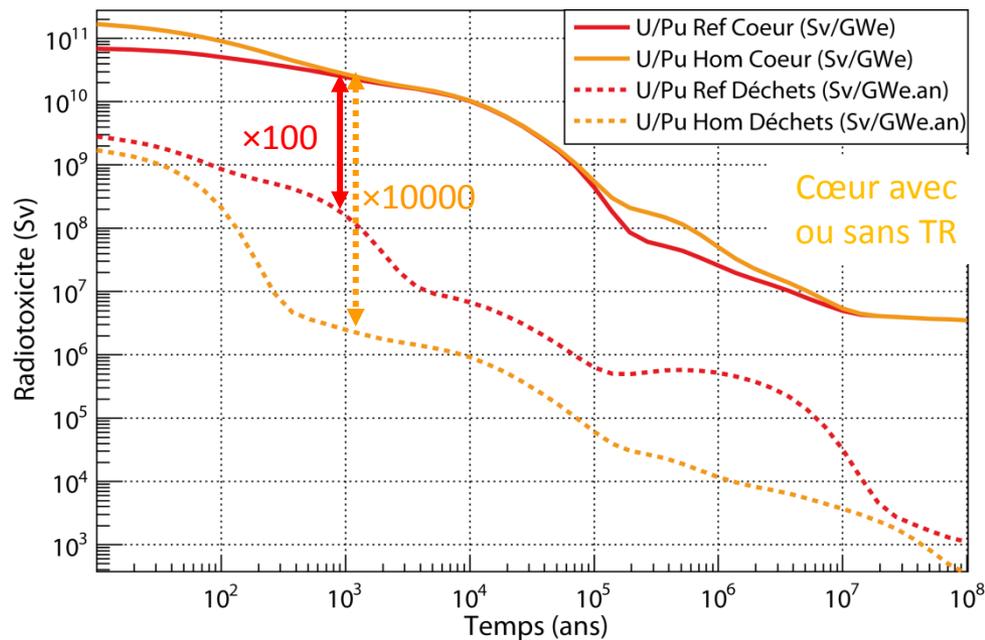
	Sans transmutation RNR	Avec transmutation Am seul	Avec transmutation tous AM
$P_{\text{thermique}}$ (W/kg)	1,5	4 à 7	9 à 160
Emission neutronique (relatif)	1	1,5 à 3,5	130 à 3600

**La transmutation du Cm est très contraignante pour les installations du cycle (enceintes blindées, télémanipulations, ...)**

Recyclage des actinides mineurs (Am, Cm, ...)  
 ⇒ réduction de la radiotoxicité des déchets ultimes

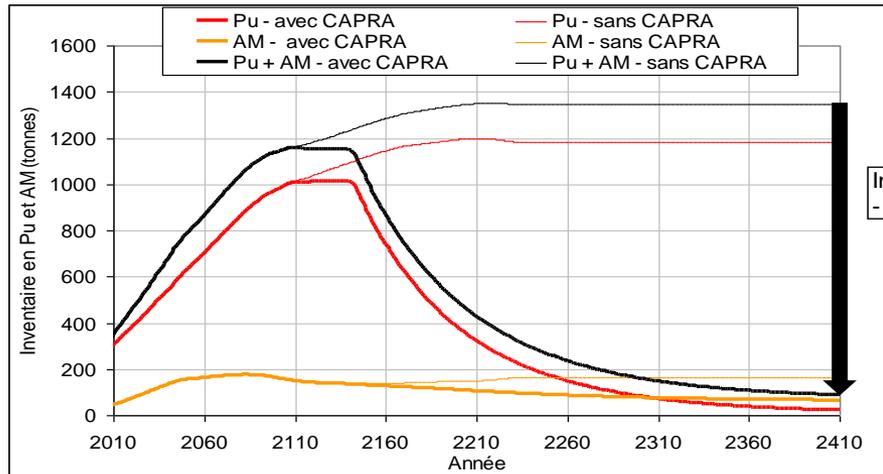


**la radiotoxicité du cœur  
 (= déchet à l'arrêt de la filière)  
 domine les déchets cumulés  
 pendant les siècles précédents (Pu !)**



**→ Gestion nécessaire de la « fin de vie » du parc**

*Recyclage en SFR-CAPRA du plutonium avec transmutation des actinides mineurs*



Inventaire Pu+AM :  
- 1260 t (- 93%)

## RECYCLAGE PU + TRANSMUTATION DES AM

Réduction significative Pu+AM (90% de inventaire)

→ 1 à 2 siècles de transmutation !

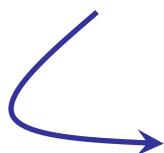


Recyclage du Pu en RNR  
Transmutation des AM en RNR

Phase out : incinération du Pu et des AM  
pendant environ 2 siècles

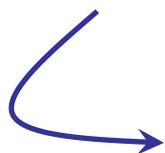
**La transmutation est un processus long !**

- on ne sait pas TOUT transmuter
- On ne transmutera QUE les déchets produits à partir de 2040  
(“fin de vie” de l’usine de La Hague)



**La transmutation est  
complémentaire au stockage**

- la transmutation est un **processus lent**
- fin de jeu (arrêt du nucléaire) : **combustible utilisé = déchet**  
radiotoxicité des déchets transmutés  $\ll$  combustibles utilisés



**Transmuter, c’est faire durer le nucléaire ...**

Au CNRS, la R&D sur le nucléaire est organisée à travers le défi NEEDS  
**N**ucléaire, **E**nergie, **E**nvironnement, **D**échets et **S**ociété

## Gestion des déchets nucléaires:

- Solution de référence: stockage géologique profond *réversible*
- Développement du nucléaire: transmutation des AM réaliste (neutrons rapides)  
→ Réduction de la taille des sites de stockage
- Faible développement du nucléaire: transmutation si volonté politique forte car  
→ Sites de stockage suffisants  
→ Recours à technologies complexes et non compétitives

**Plus on fera de nucléaire ...  
Moins on fera de déchets à vie longue !**

## Quelques sites web ... à ne pas manquer

- Autorité de Sureté Nucléaire : <http://www.asn.gouv.fr>
- ANDRA : <http://www.andra.fr>  
<http://www.dechets-radioactifs.com>
- AREVA et La Hague : <http://www.areva.com>
- CEA: <http://www.cea.fr/>
  - ✓ Clefs CEA : No 45, 46, 48 et 53
- CNRS – programme NEEDS : <http://www.cnrs.fr/mi/spip.php?article19>
- <http://sfpnet.fr/index.php?page=tpage&id=25> débats - l'énergie au XXIème siècle – énergie nucléaire