

La gestion des déchets nucléaires ou ... vers un nucléaire durable ?



« Dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre. »

Marie Curie

➤ **ÉCHELLES DE TEMPS MISES EN JEU**

⇒ un problème spécifique et donc des solutions spécifiques

➤ **DE NOMBREUX DOMAINES DE COMPÉTENCES**

- production des déchets → physique nucléaire, physique des réacteurs
- conditionnement → radiochimie, physique des matériaux
- stockage → géologie, chimie

➤ les solutions possibles dépendent de la nature des déchets et donc des choix envisagés pour **LA PRODUCTION D'ÉNERGIE**

➤ un problème de société – intervention du politique

➤ une petite touche d'irrationnel ...

➤ **PLUSIEURS SOLUTIONS POSSIBLES**

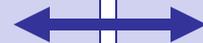
- des **recherches sont en cours**
- diversité des solutions en fonction des pays
- contraintes industrielles

ENERGIE

- Joule= 1 Newton . mètre
- 1 eV = $1.6 \cdot 10^{-19}$ J
- 1 kWh = 1000W x 1 heure = $3.6 \cdot 10^6$ J
- tep: **T**onne **E**quivalent **P**étrole
1 tep = $42 \cdot 10^9$ J = $11.7 \cdot 10^6$ W.h

PUISSANCE

- Watt: 1 W = 1 J/seconde



ÉNERGIE LIBÉRÉE PAR LA FISSION D'UN NOYAU:

$$200 \text{ millions d'eV} = 200 \cdot 10^6 \times 1.6 \cdot 10^{-19} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

ÉNERGIE LIBÉRÉE PAR 1 MOLÉCULE DE GAZ NATUREL:



1 personne en France consomme (électricité)

$$\approx 1000 \text{ W} = 9000 \text{ kWh/an} = 32 \text{ GJ / an}$$

$$\rightarrow 32 \cdot 10^9 / 3,2 \cdot 10^{-11} / 0.33 \sim 10^{21} \text{ fissions} \sim 1,2 \text{ grammes / an}$$

$$\rightarrow 32 \cdot 10^9 / 1,3 \cdot 10^{-18} / 0.5 \sim 4,1 \cdot 10^{28} \text{ molécules} \sim 2 \text{ tonnes / an}$$

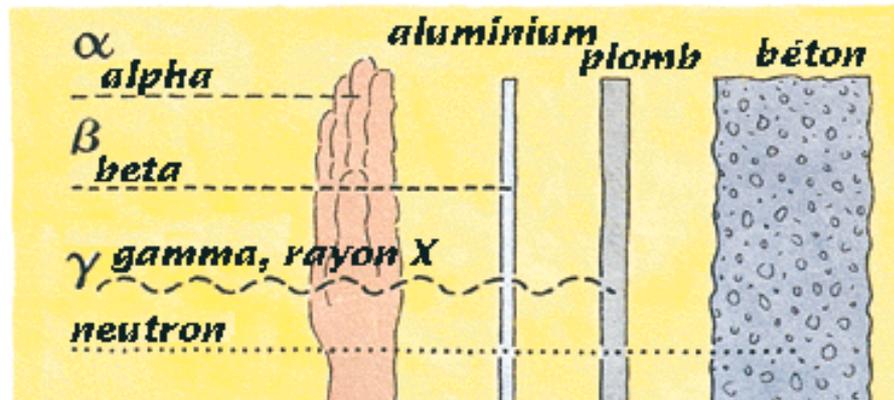
L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée

RADIOACTIVITÉ:

Activité: 1 Bq = 1 désintégration/seconde (1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq)

Energie: 1 MeV = 10^6 eV = $1,6 \cdot 10^{-13}$ J

Plusieurs types de rayonnements : γ , X, α , β , n différents effets sur l'organisme



PRINCIPAUX MÉCANISMES D'INTERACTION:

perte d'énergie par collisions électroniques puis par réaction nucléaire.

- ionisation
- rupture des liaisons chimiques
- altération des molécules
- déplacements d'atomes
- rupture de réseaux cristallins

Mesurer les effets des rayonnements

EVALUATION DU RISQUE ET EFFETS DES RAYONNEMENTS:

Activité, nature, énergie, quantité des rayonnements

**Dose absorbée dans
le tissu ou l'organisme (1 Gy = 1 J/Kg)**

Effets spécifiques des rayonnements



**Dose équivalente dans
le tissu ou l'organisme (Sv)**

W_R

X, γ , β : 1
n: 5 à 20
 α : 20

1 Sv = 100 rem

Sensibilité des tissus ou des organes



**Dose efficace dans
l'organisme entier (Sv)**

W_T

Poumons: 0,12
Foie: 0,05
Surface des os: 0,01

1 Sv correspond à une probabilité de $7 \cdot 10^{-2}$ d'apparition d'une pathologie

RADIOTOXICITÉ: toxicité de nature radioactive que peut subir un organisme qui est exposé, notamment par **ingestion** ou **inhalation**.

R = Facteur de dose (Sv/Bq) * activité

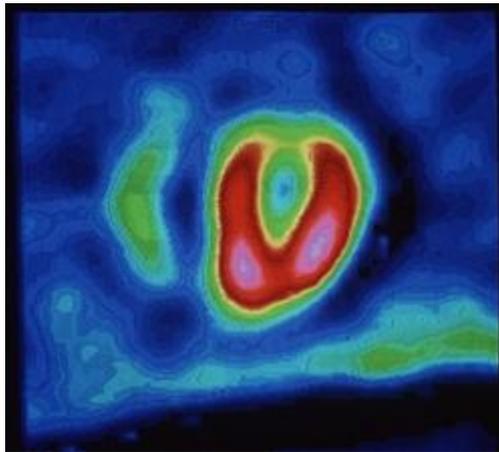
Exemples de radioactivité artificielle :

Exemples de radioactivité naturelle :

Scintigraphie thyroïdienne :	37 millions de Bq
Scintigraphie osseuse :	550 millions de Bq
Scintigraphie myocardique :	74 millions de Bq
Combustible utilisé en sortie de réacteur :	10^{19} Bq = 10 milliards de milliards de Bq

Maison en granite :	4 milliards de becquerels
Homme :	130 Bq/kg (soit environ 10 000 Bq pour un adulte)
Eau de pluie :	0,5 Bq/kg
Eau de mer :	13 Bq/kg
Brique :	800 Bq/kg
Béton :	500 Bq/kg
Artichaut :	300 Bq/kg
Café :	1000 Bq/kg
Lait :	80 Bq/kg

Scintigraphie myocardique



Maison en granite dans la Manche

Exposition artificielle

Exposition naturelle

Autres (essais nucléaires, industries)
1,5%

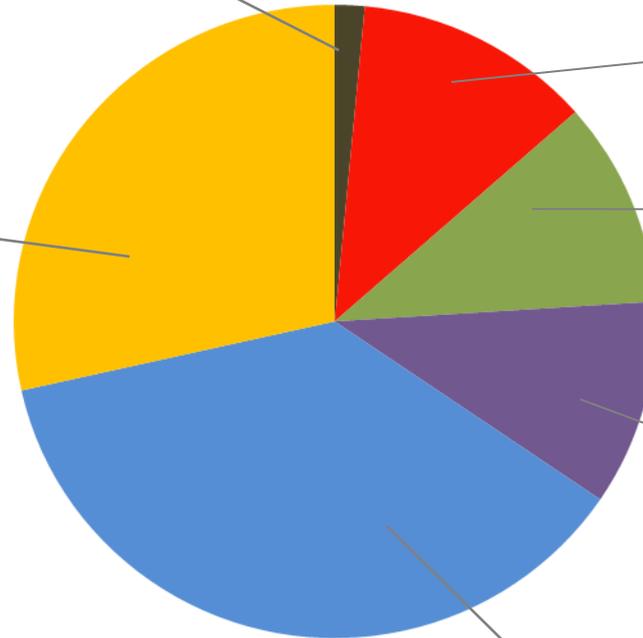
Expositions médicales
28,5%

Rayonnements terrestres
(sols) : 12%

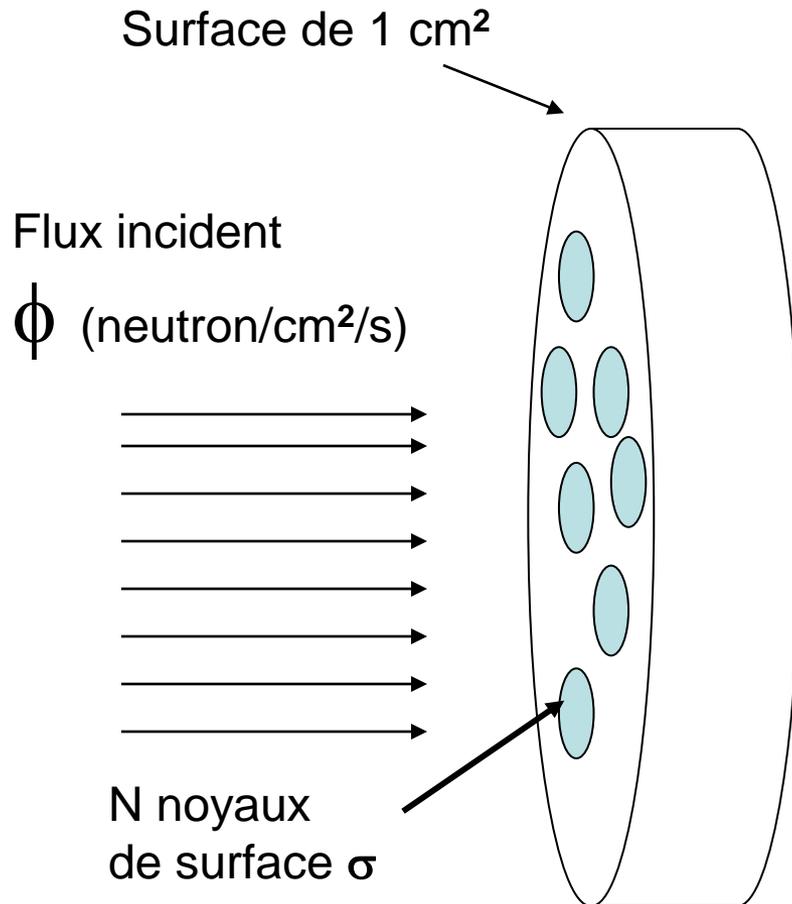
Rayonnements cosmiques: 10,5%

Eaux et aliments: 10,5%

Radon: 37%

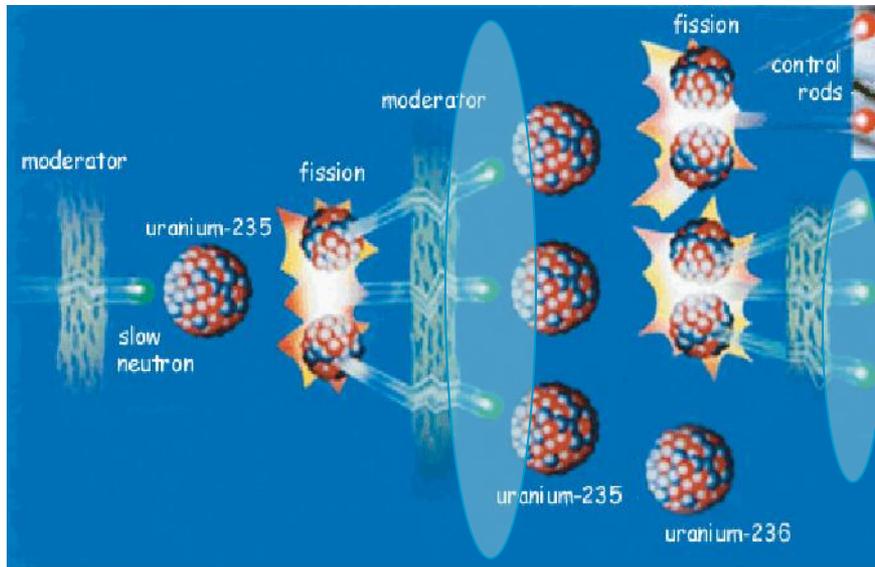


Données ANDRA



- Nb réactions par seconde $\propto N \sigma \phi$
- σ : SECTION EFFICACE
- Unité usuelle : barn = 10⁻²⁴ cm²
 1 b = 100 fm²

σ dépend
 du noyau
 de la réaction
 de l'énergie du neutron



Génération 1

Génération 2

Facteur de multiplication k
= nb nouvelles fissions induites par fission

= nb de neutrons produits par neutron absorbé

$$1 \rightarrow k \rightarrow k^2 \rightarrow \dots$$

- masse d' ^{235}U est suffisamment grande pour « compenser » les pertes, la réaction en chaîne s'établit spontanément → MASSE CRITIQUE
- Certains fragments de fission sont produits excités ; ils se désexcitent par émission β puis d'un neutron → LES NEUTRONS RETARDÉS

N_{total} produit par un neutron initial = $1+k+k^2+k^3+ \dots$

➤ **$k < 1$** : la série converge vers $N_{\text{total}} = \frac{1}{1-k}$ → SYSTÈME SOUS-CRITIQUE

le système s'arrête tout seul après quelques générations (ADS)

➤ **$k = 1$** : la réaction s'entretient d'elle-même → SYSTÈME CRITIQUE

➤ **$k > 1$** : le système diverge exponentiellement → SYSTÈME SUR-CRITIQUE

Quelques échelles de temps:

- temps moyen entre 2 générations de neutrons:
 - dans un réacteur : REP $\sim 10^{-4}$ s, RNR $\sim 10^{-6}$ s
 - dans une bombe $\sim 10^{-8}$ s
- Mouvement d'une barre de contrôle ~ 2 s
- temps moyen d'émission d'un neutron retardé: $\sim 10^{-1}$ s à quelques s

LE COMBUSTIBLE

- Seulement **0.7%** de noyau fissile (^{235}U)
 - 99.3%** de noyau absorbant (^{238}U)
- Compétition en fission ^{235}U et capture ^{238}U

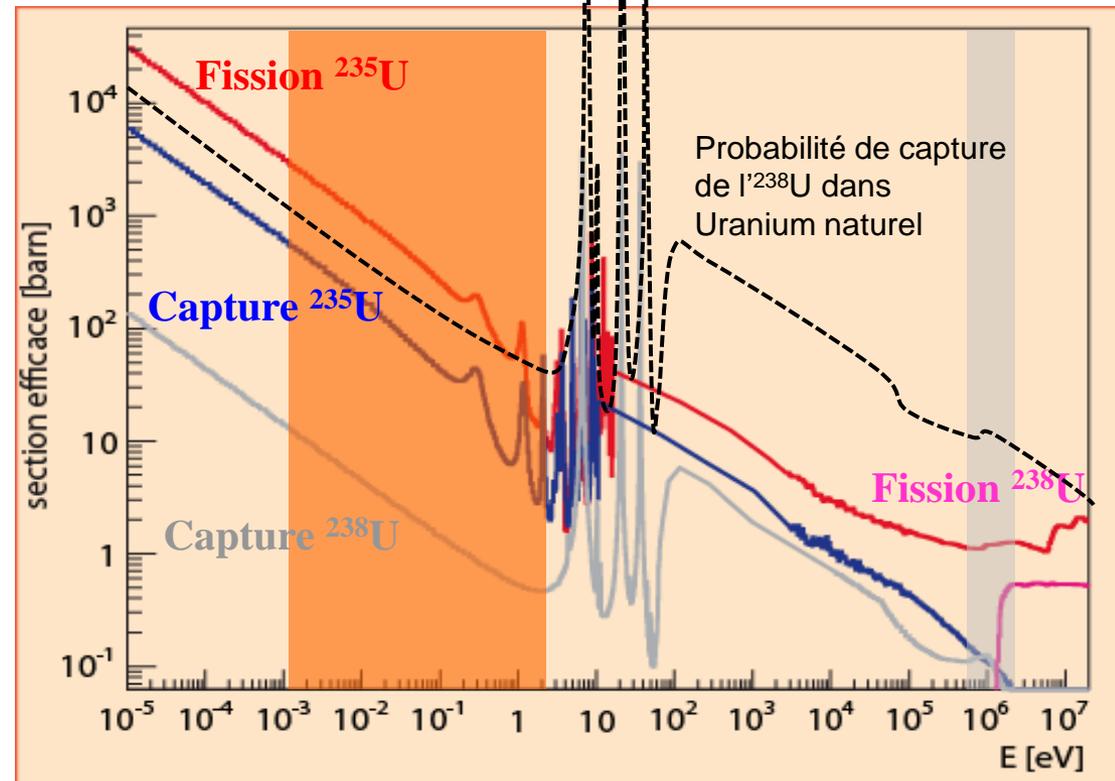
⇒ **Maximiser** la probabilité d'induire une **fission** plutôt qu'une absorption

⇒ **Modérateur** = noyaux légers (diffusion) et peu absorbants

- Graphite** : UNGG (France)
- Eau lourde D_2O** : CANDU (Canada)

n thermique ($T \sim 20^\circ\text{C}$)
Ralentissement domine

n rapide
Absorption domine



Mais eau légère H_2O trop absorbante
→ **U enrichi en ^{235}U (3 à 4%)**

Un réacteur naturel ...

$^{238}\text{U} : T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9 \text{ ans } (\alpha)$

$^{235}\text{U} : T_{1/2} = 7.1 \cdot 10^8 \text{ ans } (\alpha)$

- Il a 2 milliards d'année, l'uranium naturel comportait 3.44% d' ^{235}U
- Masse critique suffisante et bonne modération (eau)
- Régulation (bore, densité de l'eau)



Naturellement, une réaction en chaîne s'est maintenue pendant des milliers d'années

$P_{\text{moyen}} \sim 100\text{kW}$

LOI DE PROGRAMME 2006 – 739 DU 28/06/2006 (ARTICLE 5)

RELATIVE À LA GESTION DURABLE DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

« Une **SUBSTANCE RADIOACTIVE** est une substance qui contient des radionucléides, naturels ou artificiels, dont l'activité ou la concentration justifie un contrôle de radioprotection. **→ radioactivité et seuil d'admission**

« Une **MATIÈRE RADIOACTIVE** est une substance radioactive pour laquelle une utilisation ultérieure est prévue ou envisagée, le cas échéant après traitement.

« Un **COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE** est regardé comme un **COMBUSTIBLE USÉ** lorsque, après avoir été irradié dans le cœur d'un réacteur, il en est définitivement retiré.

« Les **DÉCHETS RADIOACTIFS** sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée. **→ utilisation**

« Les **DÉCHETS RADIOACTIFS ULTIMES** sont des 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 ou dangereux. »

 **ASN** (AUTORITÉ DE SURETÉ NUCLÉAIRE)

Assure au nom de l'Etat le contrôle technique et réglementaire de la sûreté et de la radioprotection



CLI (COMITÉ LOCAL D'INFORMATION) : «contrôle » de la société civile



IRSN (INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SURETÉ NUCLÉAIRE)

Expert technique de l'ASN

 **AREVA**

la mine, fabrication et retraitement du combustible, concepteur et fabricant des centrales nucléaires



CEA
Soutien à AREVA
R&D

 **EDF**

Exploitant des centrales nucléaires



CNRS (ET UNIVERSITÉS)
R&D → programme PACEN



ANDRA (AGENCE NATIONALE POUR LA GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS)

Gestion des déchets radioactifs



LES MINISTÈRES

Industrie, Environnement,
Santé, Recherche



Les principaux éléments produits

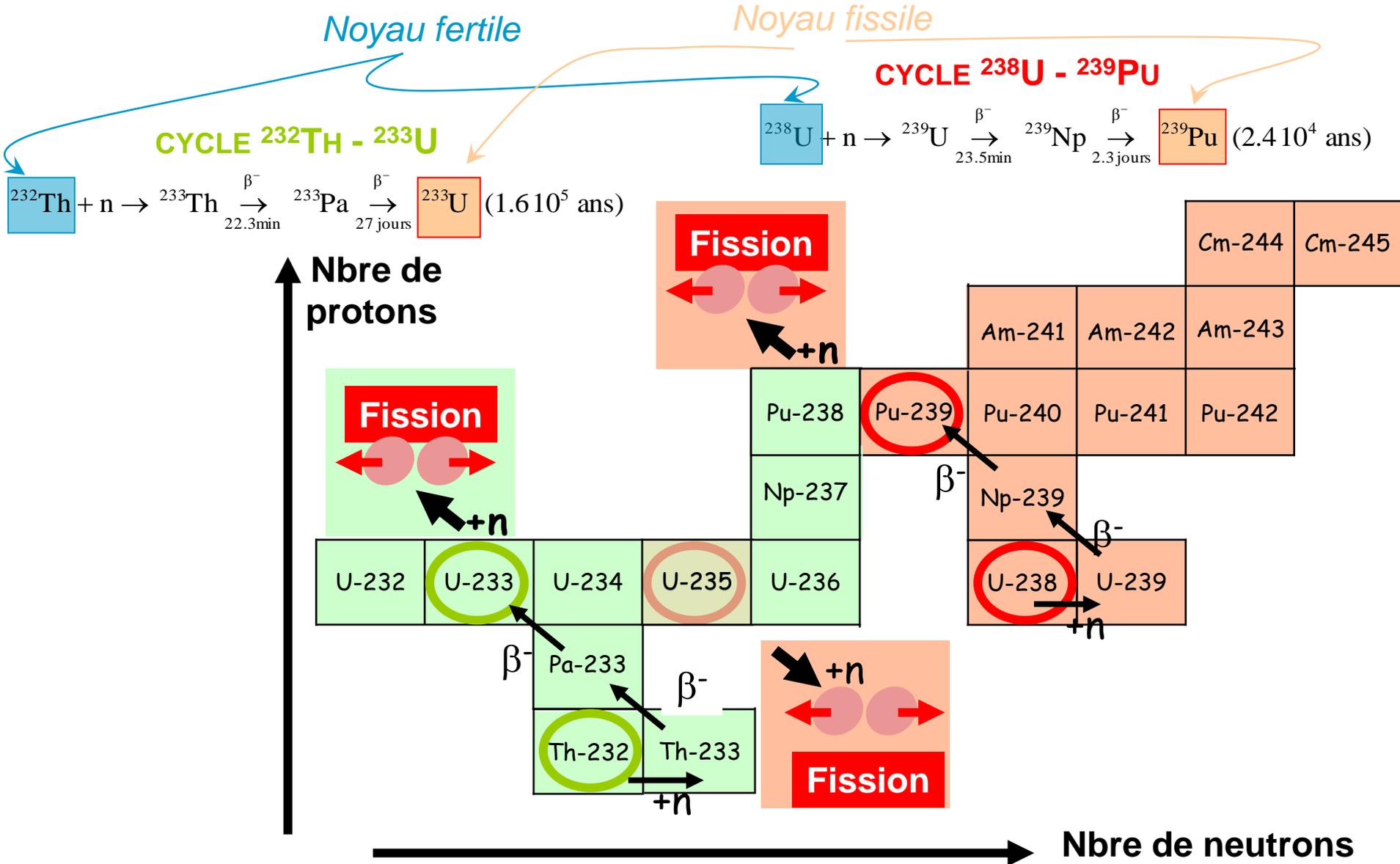
58 REP – 400TWh/an – 1200 t CU →

95% U résiduel
 1% Pu et transuraniens
 0,1% transuraniens
 4% produits de fission

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	Ln	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	An	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun								

lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

- noyaux lourds
- produits d'activation
- produits de fission
- produits de fission et d'activation
- radionucléides à vie longue



Production – les quantités (I)

Isotope ($T_{1/2}$ (an))	Facteur de dose ($\mu\text{Sv/Bq}$)	Entrée (kg/an)	Sortie (Kg/an)	Bilan (Kg/an)
U		23870	22457	- 1413
^{234}U ($2.45 \cdot 10^5$)	0.049	8	4	- 4
^{235}U ($7.08 \cdot 10^8$)	0.047	883	169	- 714
^{236}U ($2.34 \cdot 10^7$)		0	114	114
^{238}U ($4.47 \cdot 10^9$)	0.045	22979	22169	- 809
^{237}Np ($1.14 \cdot 10^6$)	0.11	0	14	14
Pu		0	274	274
^{238}Pu (87.7)	0.23	0	6	6
^{239}Pu (24 119)	0.25	0	142	142
^{240}Pu (6 569)	0.25	0	66	66
^{241}Pu (14.4)	0.0048	0	41	41
^{242}Pu ($3.7 \cdot 10^5$)	0.24	0	19	19
$^{241,243}\text{Am}$	0.20	0	6	6
$^{244,245}\text{Cm}$	0.10 à 0.30	0	3	3

Bilan REP-Uox 1 Gwe.an ;
 enrichissement : 3.7% en ^{235}U
 45 GWj/t; 4 ans en réacteur
 Conversion Q/E=34%

Bilan massique global:

24t d'U enrichi
 chargé pour « brûler »
1.115 t noyaux lourds !

Bilan REP-Uox 1 Gwe.an ;
enrichissement : 3.7% en ^{235}U
45 GWj/t; 4 ans en réacteur
Conversion Q/E=34%

... Mais il y a des restes

Bilan global:

Uranium:

^{235}U (à 0.75%!) (URT)
+ réenrichissement = URE

Plutonium:

^{239}Pu et ^{241}Pu fissiles !
Séparation chimique
+ Recyclage
→ MOX

Isotope ($T_{1/2}$ (an))	Facteur de dose ($\mu\text{Sv/Bq}$)	Entrée (kg/an)	Sortie (Kg/an)	Bilan (Kg/an)
<i>U</i>		23870	22457	- 1413
^{234}U ($2.45 \cdot 10^5$)	0.049	8	4	- 4
^{235}U ($7.08 \cdot 10^8$)	0.047	883	169	- 714
^{236}U ($2.34 \cdot 10^7$)		0	114	114
^{238}U ($4.47 \cdot 10^9$)	0.045	22979	22169	- 809
^{237}Np ($1.14 \cdot 10^6$)	0.11	0	14	14
<i>Pu</i>		0	274	274
^{238}Pu (87.7)	0.23	0	6	6
^{239}Pu (24 119)	0.25	0	142	142
^{240}Pu (6 569)	0.25	0	66	66
^{241}Pu (14.4)	0.0048	0	41	41
^{242}Pu ($3.7 \cdot 10^5$)	0.24	0	19	19
$^{241,243}\text{Am}$	0.20	0	6	6
$^{244,245}\text{Cm}$	0.10 à 0.30	0	3	3

**1 REP : Uox = 23 tonnes annuelles
burn-up de 33 GWJ/t**

Isotope ($T_{1/2}$ (an))	Facteur de dose ($\mu\text{Sv/Bq}$)	1 t d'U
<i>PF VC + VM ≤ 30 ans</i>		<i>31.1 kg</i>
^{90}Sr (28)	0.028	0.1
^{137}Cs (30)	0.013	0.1
<i>PF VL</i>		<i>3</i>
^{93}Zr ($1.5 \cdot 10^6$)	0.0011	0.71
^{90}Tc ($2.1 \cdot 10^5$)	0.000022	0.81
^{129}I ($1.57 \cdot 10^7$)	0.11	0.17
^{135}Cs ($2.1 \cdot 10^6$)	0.003	1.13
<i>Total PF</i>		<i>34.1 kg</i>

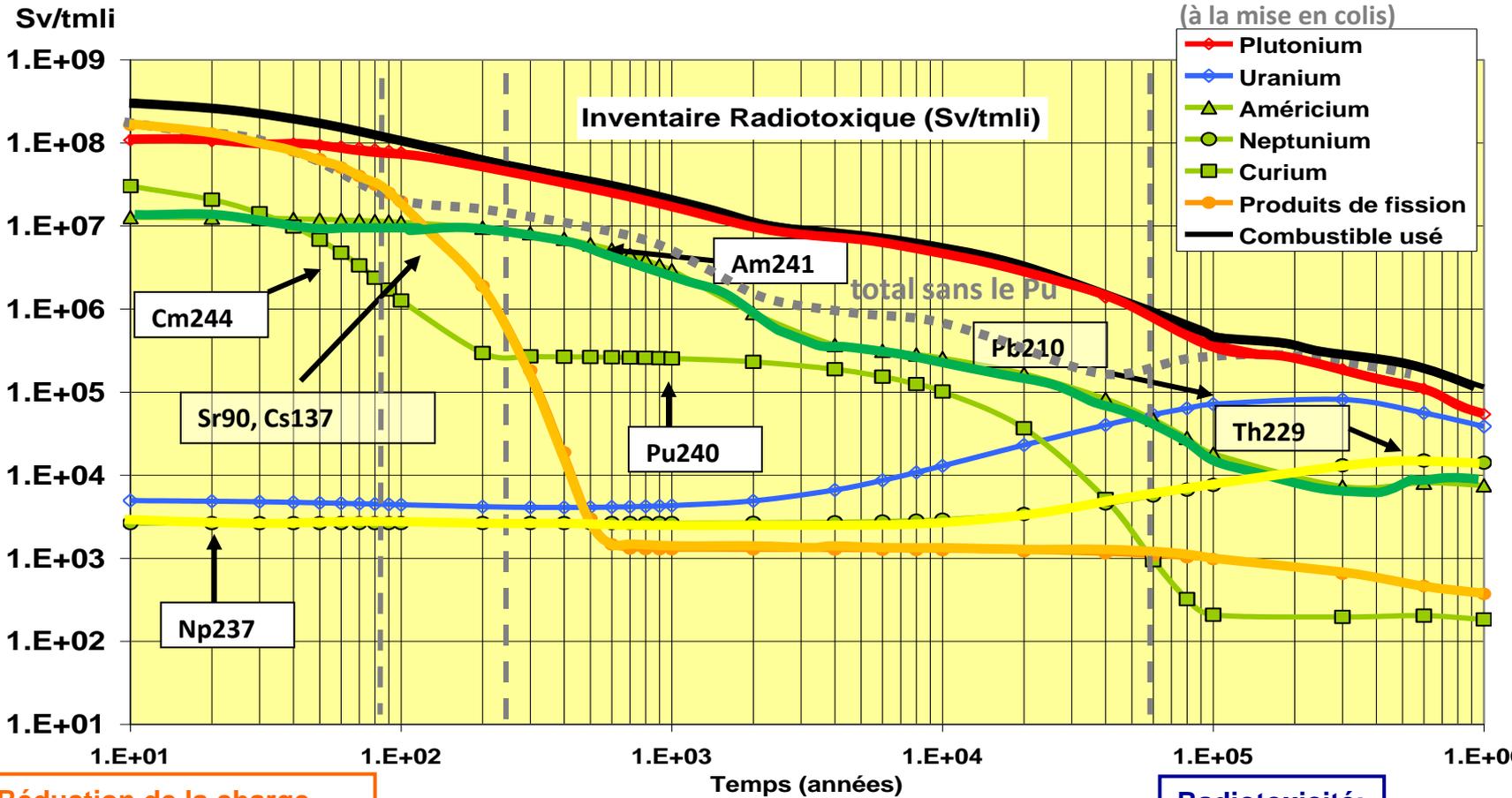
Vies courtes et moyennes:

La majorité des VC et VM
devient stables après 10 ans

Radiotoxicité:

Effets moins importants que
ceux des actinides mineurs

Evolution de la radiotoxicité (ingestion totale) du combustible utilisé



1-5 ans

Réduction de la charge thermique refroidissement à sec

Radiotoxicité:
 $^{235,236,238}\text{U}$
 $^{237}\text{Np}, ^{242}\text{Pu}$

Radiotoxicité et charge thermique forte : refroidissement en piscine auprès du réacteur

charge thermique:
 ^{238}Pu (87.7 ans)
 ^{241}Am (432 ans)

faible charge thermique
 Radiotoxicité:
 $^{239-240-242}\text{Pu}$
 $^{237}\text{Np}, ^{241}\text{Am}$

UOx, 3.7% d' ^{235}U ; 55 GW.j/t après 5 ans de refroidissement

LOI N° 2006-739 DU 28 JUIN 2006 DE PROGRAMME RELATIVE À LA GESTION DURABLE DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

- « finaliser » les 3 axes de recherche développés dans le cadre de la loi du 30/12/ 1991
 - 1. Séparation et transmutation** → pilote CEA
 - Bilan en 2012 sur les filières de transmutation
 - Construction d'un prototype en 2020 – Mise en service en 2040
 - 2. Stockage géologique profond réversible** → pilote ANDRA
 - Solution de référence pour les déchets HA et MAVL
 - Dépôt d'une Demande d'Autorisation de Construction en 2015
 - Rendez vous parlementaire en 2015
 - Mise en exploitation en 2025
 - 3. Conditionnement et entreposage** → pilote CEA
 - création de nouvelles installations ou modification des installations existantes en 2015

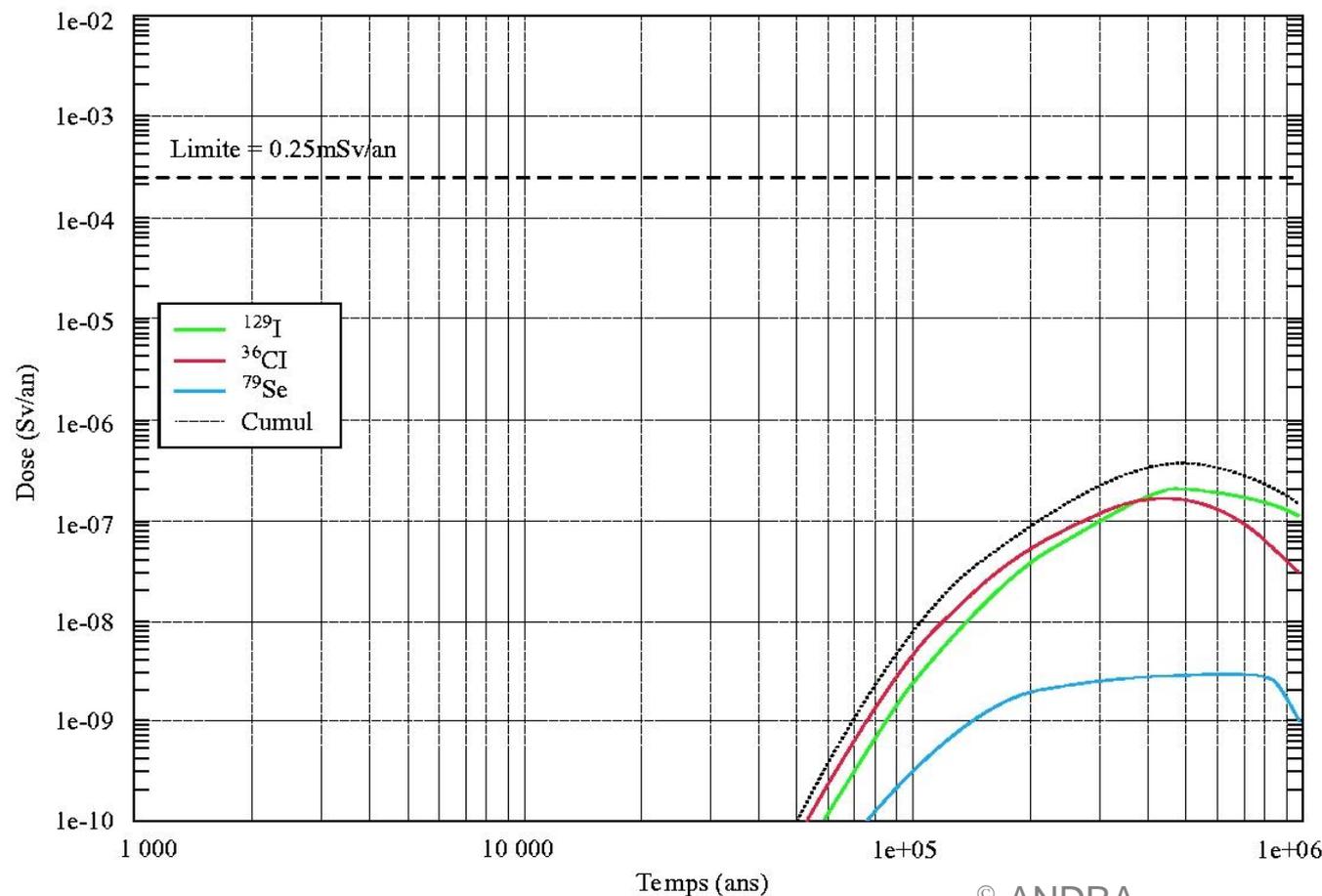
- Plan National de Gestion des Matières et Déchets Radioactifs (PNGMDR)
 - ✓ Réduction de la quantité et de la nocivité des déchets
 - ✓ entreposage comme étape préalable
 - ✓ stockage comme solution pérenne, (déchets MA et HA-VL)

➤ « Organise » la transparence et le contrôle démocratique

- Renforcement de l'indépendance de la Commission Nationale d'Evaluation
- Interdiction de stocker en France des déchets radioactifs étrangers
- Comité Local d'Information et de Suivi (laboratoire souterrain) renforcé
- **rendez vous parlementaire en 2015** pour fixer les conditions de réversibilité du stockage géologique ...
- ... précédé par la consultation des collectivités territoriales et un **débat public**

➤ **Organisation** et le **financement spécifique** de la gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs

- accompagnement local → Groupement d'Intérêt Public
 - financement d'aménagement du territoire
 - financement des recherches
 - Mission d'intérêt général confiée à l'ANDRA
 - **Collecte des déchets radioactifs des propriétaires non solvables**
 - **Assainissement des sites pollués « orphelins »**
- Taxes additionnelles à la taxe INB**



© ANDRA,
rapport Argile, 2005

Evolution (dans des conditions normales) de la dose en fonction du temps à l'exutoire pour un site de stockage (concept Argile ANDRA) contenant des déchets vitrifiés

- 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

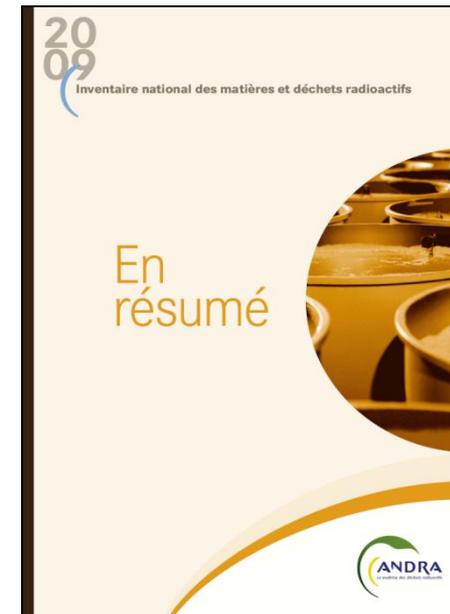
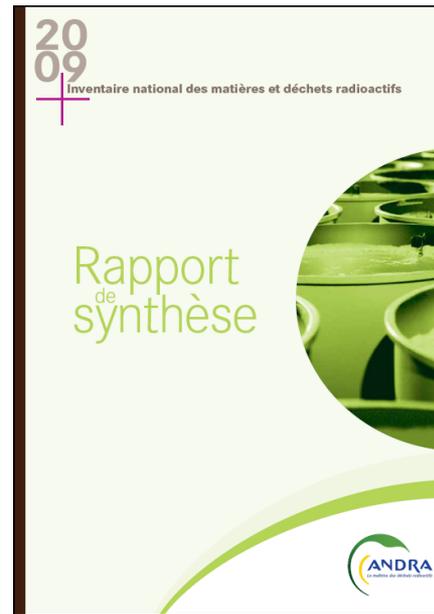
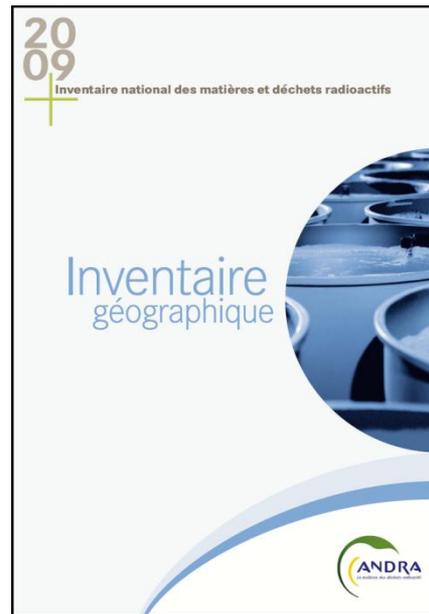
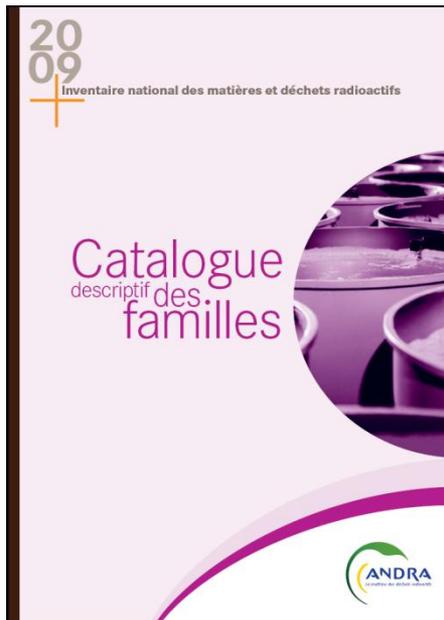
dépend de la nature des déchets

- 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>

L'INVENTAIRE NATIONAL DES MATIÈRES ET DÉCHETS RADIOACTIFS

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
Très Faible Activité (TFA) < 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)	
Faible Activité (FA) < 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)
Moyenne Activité (MA) 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)
Haute Activité (HA) 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.

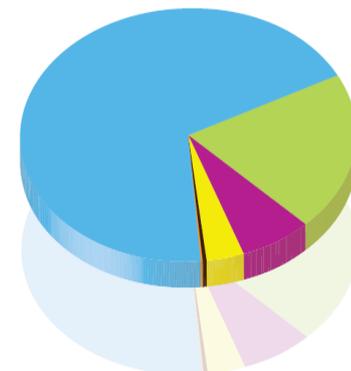
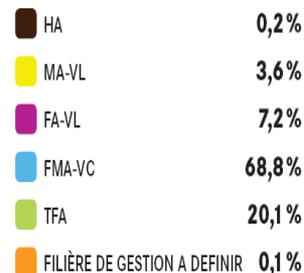
Un projet de stockage est en cours d'étude à 500m de profondeur

Inventory national des déchets radioactifs (Andra, édition 2009)

Volumes des déchets radioactifs, entreposés ou stockés, à fin 2007, en m³ équivalent conditionné

	Volumes (m ³)
TFA	231 688 (dont 89 331 stockés)
FMA-VC	792 695 (dont 735 278 stockés)
FA-VL	82 536
MA-VL	41 757
HA	2 293 (dont 74 de combustibles usés)
Filière de gestion à définir*	1 564
Total	1 152 533 (dont 824 609 m ³ stockés)

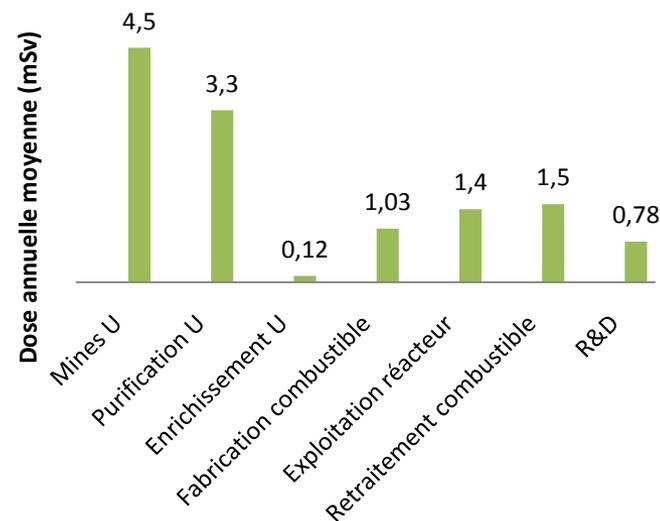
*Les déchets identifiés dans la catégorie « filière de gestion à définir » sont ceux que les producteurs déclarent sans les attribuer à une des filières de gestion existantes ou à l'étude. Soit parce qu'ils se présentent sous une forme chimique et physique qui ne permet pas aujourd'hui de les associer à une de ces filières, soit parce qu'aucun mode de traitement n'est envisagé pour le moment.



EXPOSITION DES TRAVAILLEURS: LÉGISLATION

- dose < 50 mSv sur une période de 5 ans
- travailleurs exposés: 20 mSv sur une année

(Rapport du Comité scientifique des Nations Unies sur les effets des radiations atomiques.)



La loi demande l'étude de 2 pistes:

1. La **séparation / transmutation** des déchets HA-MA VL
 - a. incinération en réacteur électrogène : les RNR
 - b. incinération en réacteur dédiés: les ADS
2. Une **solution de référence**: le stockage géologique profond et réversible

LE PROCHAIN COURS:

- quelques rappels
- le cycle du combustible: quelques mots sur la production d'électricité nucléaire en France
- les filières de gestion actuelles
- les filières de gestion à définir: la R&D

La gestion des déchets nucléaires

Suite ... et fin



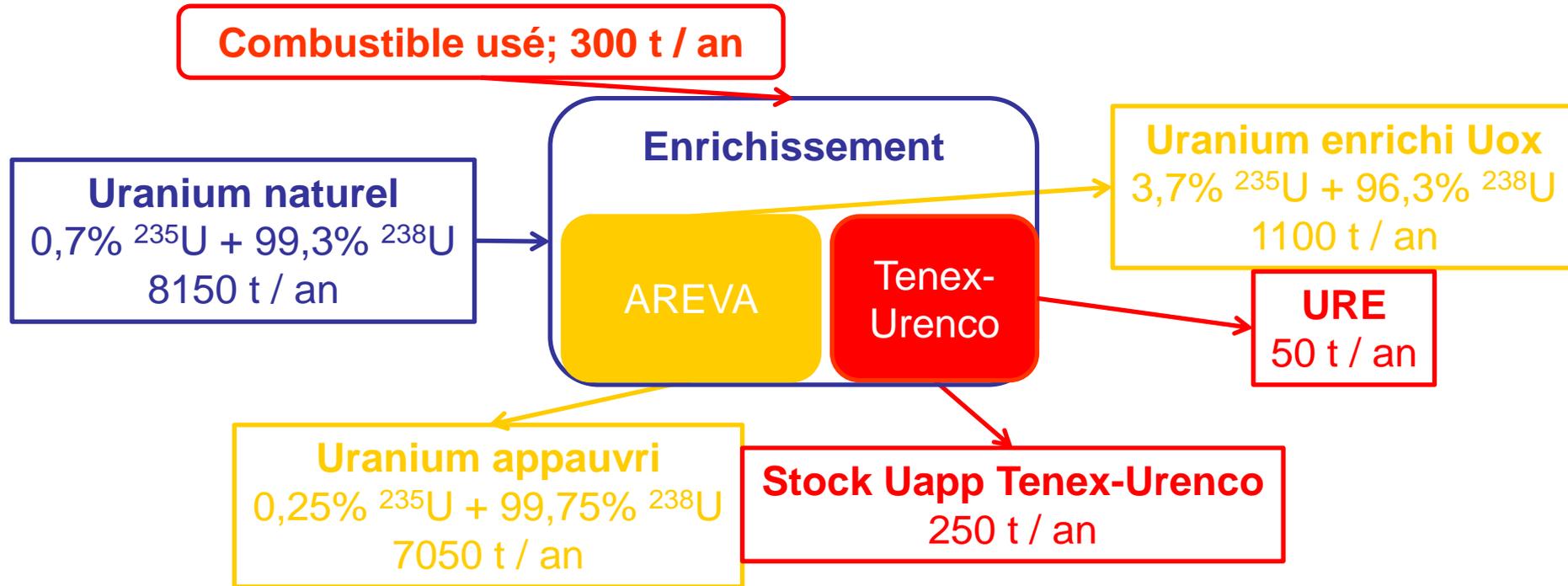
PETIT RÉSUMÉ DU 1^{IER} COURS

- La gestion des déchets radioactifs est très encadrée par la loi
- La notion de **déchet radioactif** dépend de son **éventuelle utilisation**
- Le « comportement des déchets » dépend de la période à laquelle on le considère
- Certains types de déchets (HA et MA-VL) n'ont pas encore de filière de gestion
- Pour les déchets les plus radiotoxiques, **le stockage géologique profond réversible** est considéré comme la solution de référence
- La séparation / transmutation : la solution d'avenir ?

PLAN

- le contexte « politique »
- le cycle du combustible en France
- les filières de gestion existantes
- les filières de gestion à définir/préciser: la R&D

L'URANIUM S'APPAUVRI ... ET LES RUSSES ENRICHISSENT



LA CHALEUR RÉSIDUELLE DES DÉCHETS HA – LES COLIS DE DÉCHETS VITRIFIÉS

Retraitement de 1,35 t d'Uox → 1 colis de déchets vitrifiés

Volume: 150 litres

400 kg dont 11 kg de déchets radioactifs

Dégagement de chaleur: 1900 W à la fabrication.

900 W après 30 ans

International



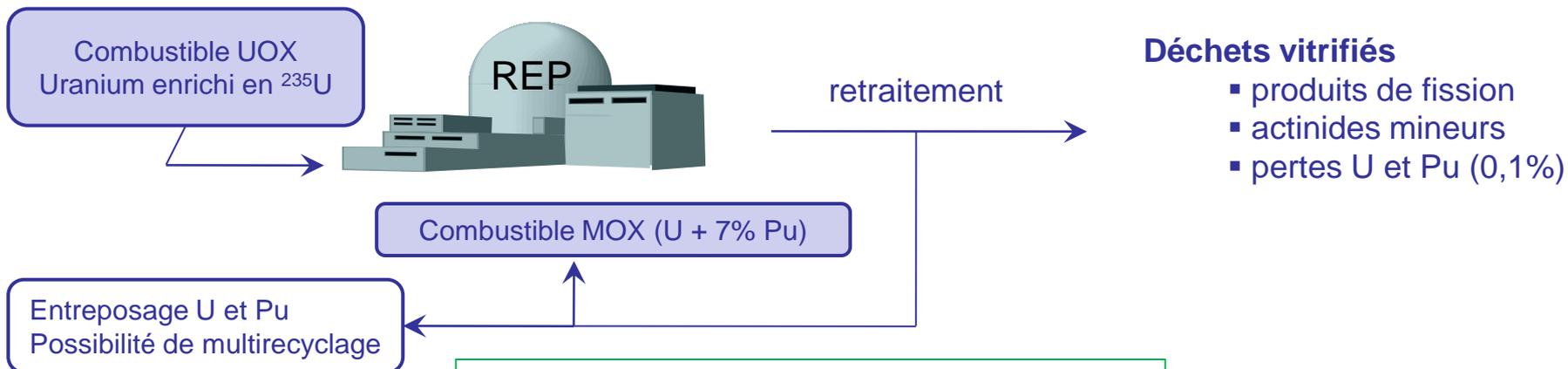
- **améliorer la sûreté nucléaire,**
- améliorer la résistance à la prolifération,
- **minimiser les déchets,**
- **optimiser l'utilisation des ressources naturelles,**
- diminuer les coûts de construction et d'exploitation des réacteurs.

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

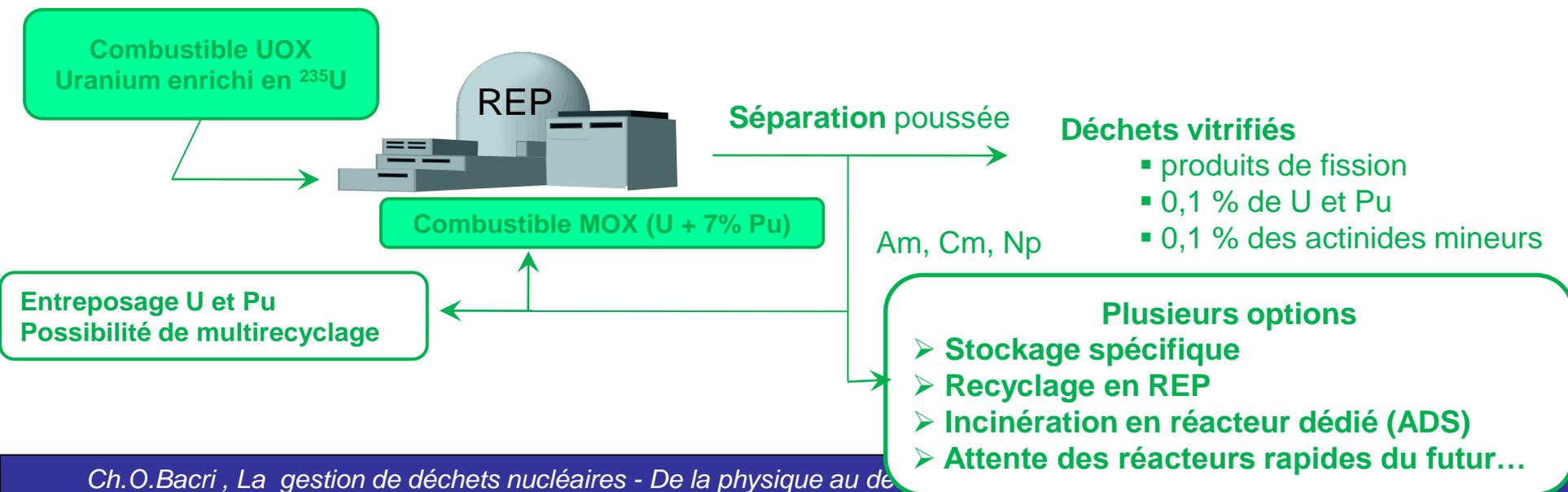
France

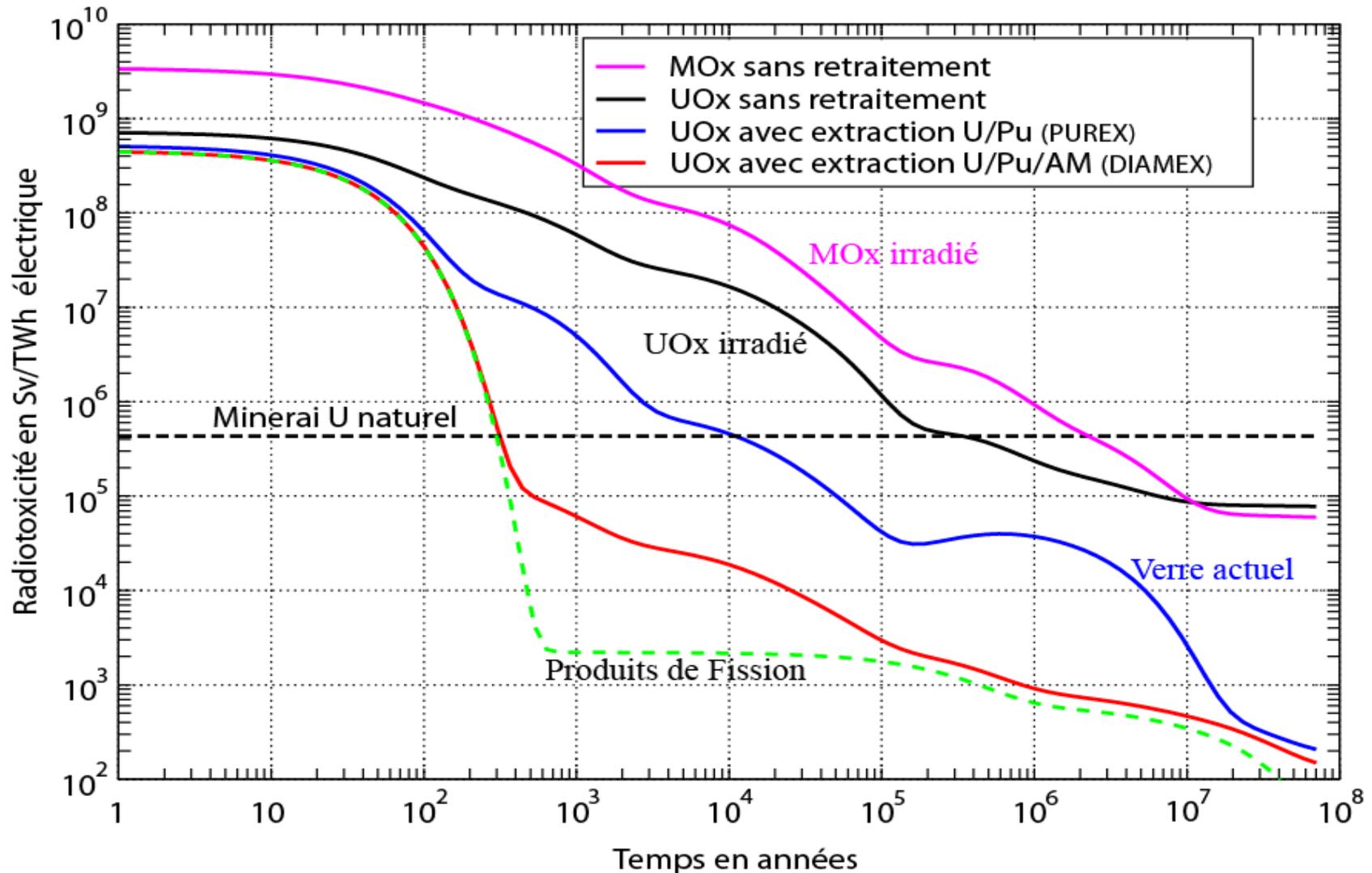
- Loi du 28 Juin 2006
relative à la **gestion durable** des matières et déchets radioactifs
- séparation et **transmutation**
 - stockage géologique profond réversible
 - conditionnement et entreposage

Le cycle actuel en France



Stratégies possibles pour le futur







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 α)

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 α

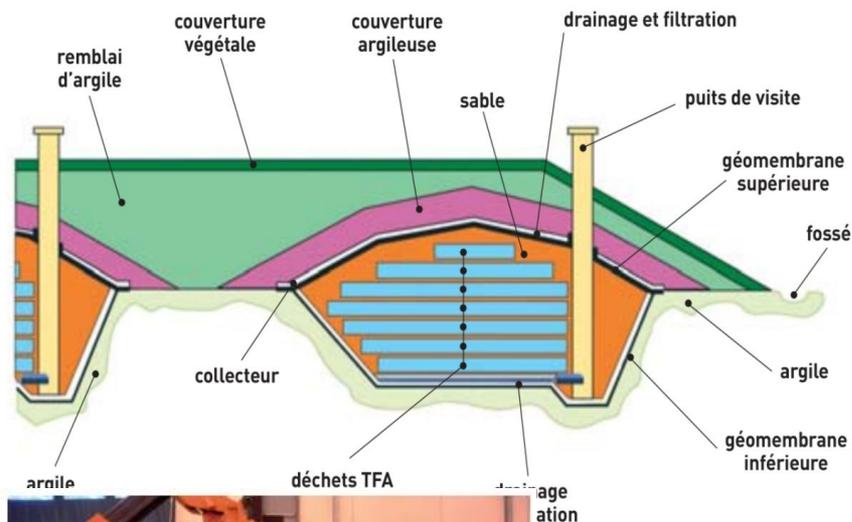
... Et dans le **Pacifique**
(1967 - 1982)
2000 -3000m de fond
11 600 colis
3 200 tonnes
23 TBq en α
0.7 Bq en β et γ

La France est le seul pays à avoir décidé de créer une filière spécifique.

→ le **Centre de Stockage TFA** en service depuis Aout 2003.

PROVENANCE

- des démantèlements
 - de l'assainissement des sites pollués
- capacité de stockage: 650 000 m³ (~ 750 000 t), sur 28.5 hectares
- Quantité stockée au 31/12/2007 : **89 331 m³**
- durée d'exploitation: 30 ans
- 25m d'argile reposant sur des sables argileux (faible circulation d'eau)



➤ avant 1969 : 14 300 m³ immergé dans l'Atlantique

➤ 1969 – 1978: les premiers stockages



- stockage en pleine terre
- eaux de pluies recueillies dans des fossés
- contrôles dans un bassin de rétention
- abandonné dès 1970
- ➔ plates-formes recouvertes d'un revêtement de bitume et équipées d'un drain d'écoulement des eaux

➤ 1991 - 1997: couverture finale du site



- bitume + terre + sable

➤ 1979: création de l'ANDRA

- reprise des premiers colis stockés
- standardisation des colis et procédures d'agrément imposées aux producteurs de déchets

➤ 1984: principes définitifs de stockage



- reconditionnement de tous les futs

➤ Quantités stockées : 527 225 m³ de déchets de faible et moyenne activité

➤ depuis Janvier 2003 : en phase de surveillance

➤ surveillance très active pendant 10 ans



Mise en place de caissons de 5 m³ dans une alvéole de stockage au CSFMA



Colis de déchets FMA-VC en alvéole (phase de gravillonnage)

➤ **Ouverture en 1992 pour remplacer le centre de la Manche**

➤ **Accueil de 90% des volumes annuels de déchets radioactifs**

➤ **capacité du centre: 10⁶ m³**

➤ **quantités stockées en France fin 2007: 208 053 m³**

PROVENANCE

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

Quelques types de colis:



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

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

Loi du 28 Juin 2006
et PNGMDR

OBJECTIFS DE LONG TERME

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

A COURT TERME (DÉBUT 2009), CHOIX DES 2 OU 3 SITES D'INVESTIGATION

- Mission confiée à l'Andra en juin 2008 de 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**

R&D (2009-2010) ...

- Investigations sur site
- Elaboration des projets de territoire



Recherche de site

... PUIS CHOIX DU SITE

- Stabilisation de l'inventaire en 2010
- En 2011 - 2013 : débat public puis choix de site

DÉCHET MAVL: (~ 41 737 m³ en 2007)

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



Conteneur de déchets compactés CSD-C



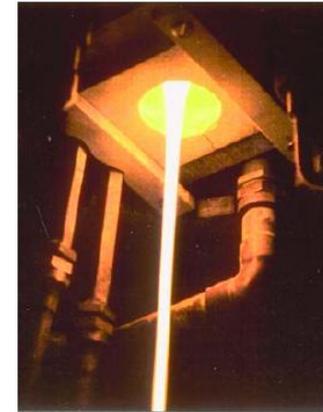
**Ceci n'est pas un déchet
c'est une matière valorisable !**



Combustible utilisé:
~ 1000 t / an

DÉCHET HA: (2 203 m³ en 2007)

- retraitement des combustibles irradiés



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

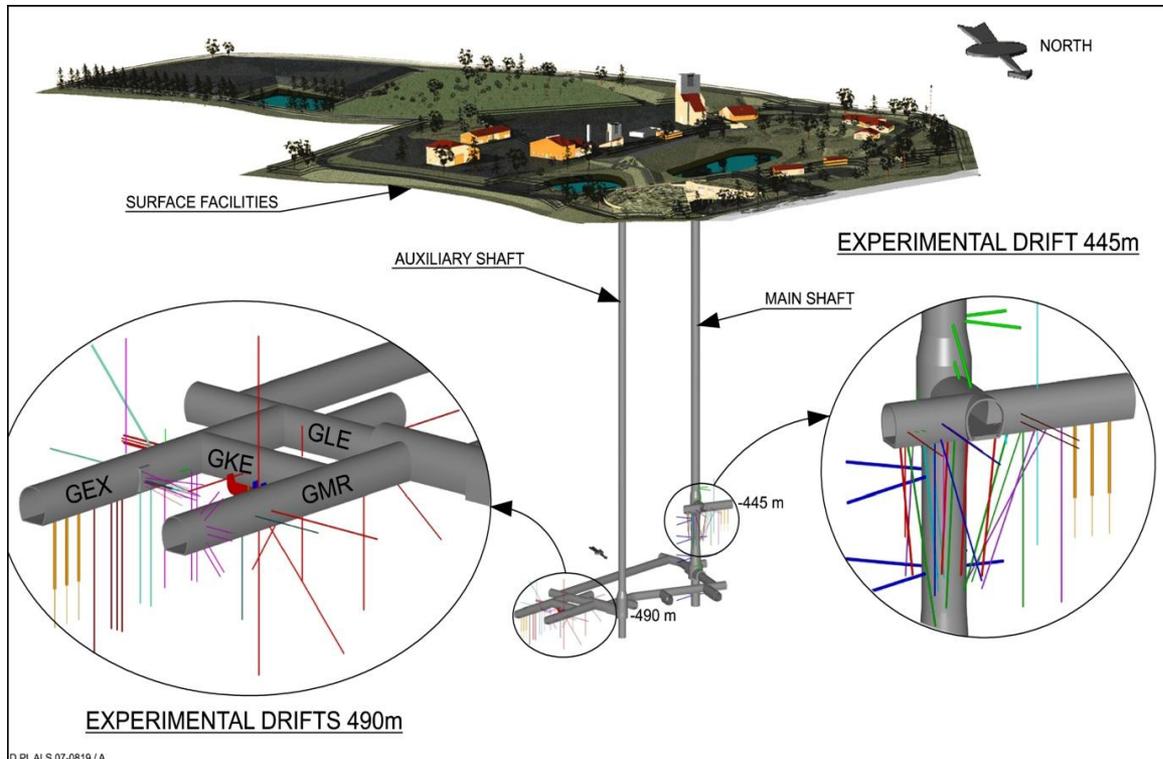


Conteneur de déchets vitrifié CSD-V
(150 litres)
Stockage/Entreposage

LES SITES POSSIBLES

- **FORMATIONS ARGILEUSES**
 - Ecoulement d'eau très faible – grande perméabilité chimique
 - Roche plastique : scellement optimal (mais travaux délicats)
 - Conductivité thermique médiocre
- **FORMATIONS GRANITQUES**
 - Très peu perméable à l'eau
 - Forte résistance mécanique mais présence possible de fractures
- **ROCHES VOLCANIQUES**
 - Bonne résistance thermique et mécanique
 - Site « unique » de Yucca Mountains (ouverture prévue en 2012 ... mais déjà plein !)
- **SEL**
 - Très très peu perméable à l'eau
 - Ressource précieuse
 - WIPP (Waste Isolation Pilot Plant, Nouveau-Mexique) : déchets MA-VL (transuraniens d'origine militaire) dans une couche de sel à 650 m.
 - Mine de Asse, Allemagne : laboratoire & entreposage « définitif » jusqu'en 1978 à 750m

- Site argileux
- Recherches depuis 1994
- Le Laboratoire de Bure ne sera pas le centre de stockage
- Lieu devenu symbolique des mouvements « anti nucléaires »



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 à creuser*
- 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.** »

Concept ANDRA d'une **échelle de réversibilité** – définition internationale ?

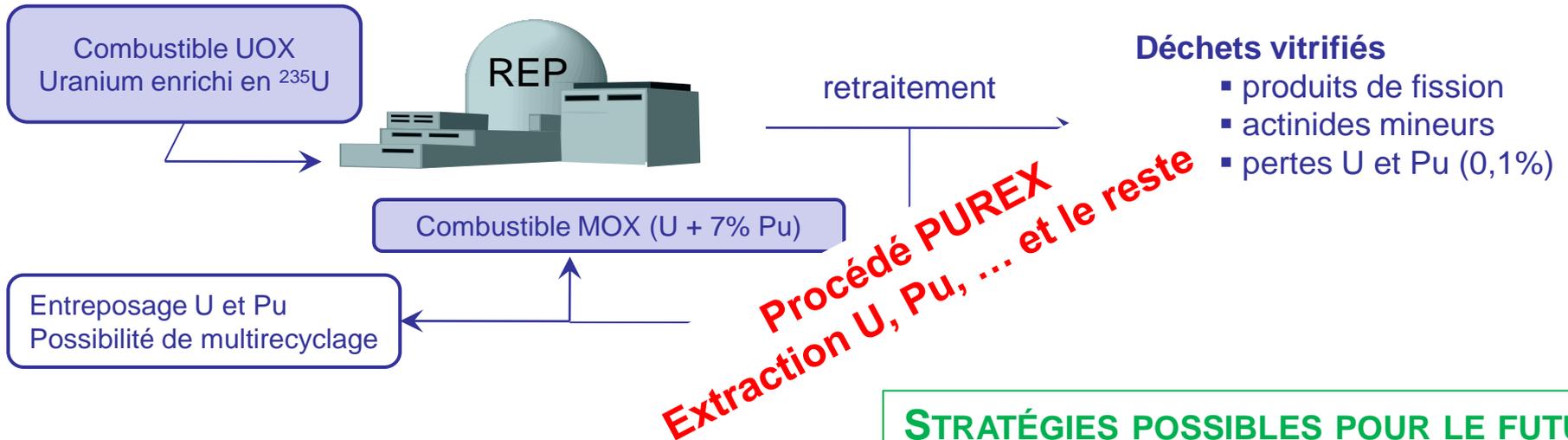
- niveau 0: déchet non conditionné
- niveau 1: déchet conditionné et entreposé en surface
- niveau 2: déchet stocké en profondeur et facilement récupérable
- niveau 3: alvéoles scellées – récupérabilité si atteinte à l'intégrité de l'alvéole
- niveau 4: travaux miniers pour accéder aux alvéoles et récupérer les colis
- niveau 5: travaux miniers pour accéder aux alvéoles et récupérer les déchets (altération des colis et confinement grâce aux installations souterraines)

Réversibilité du stockage → réversibilité des processus décisionnels
⇒ **Études SHS**

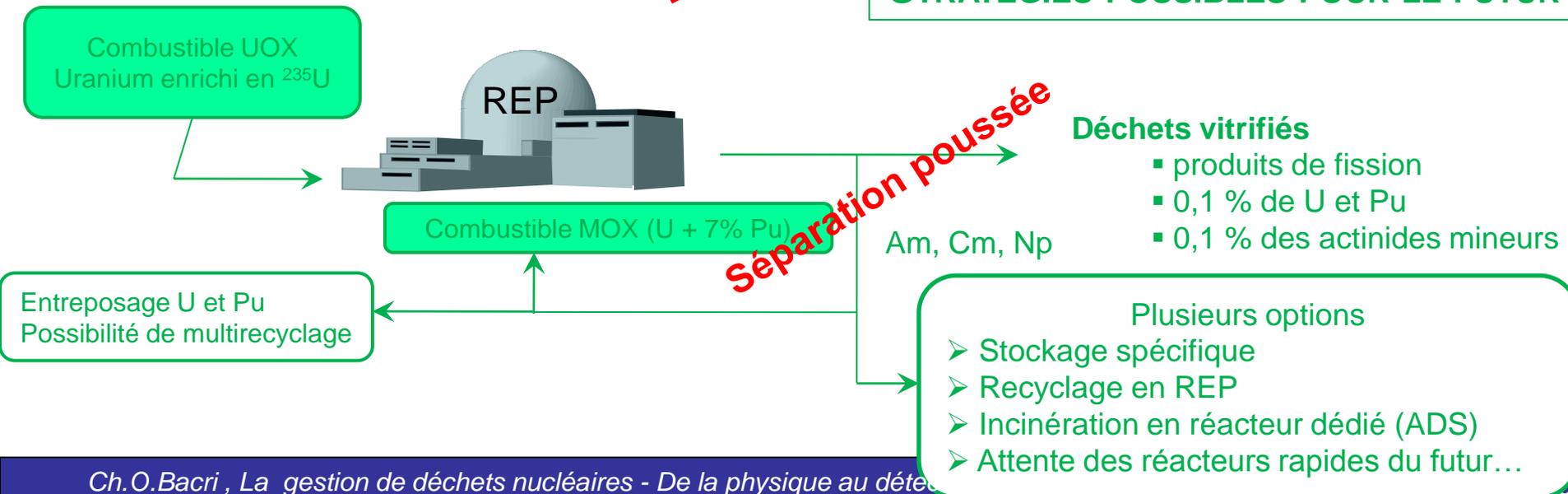
© ANDRA 2008



LA SÉPARATION, AUJOURD'HUI



STRATÉGIES POSSIBLES POUR LE FUTUR



DIFFÉRENTES OPTIONS:

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

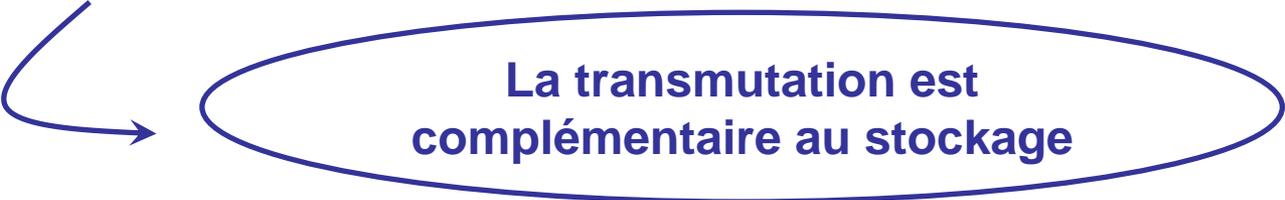
POUR QUOI FAIRE ?

- **réduire la quantité et la nocivité** des déchets (loi de 2006)
 - transmuter les actinides mineurs
 - ... **en complément du recyclage du Pu**
 - ... **qui ne migrent pas dans le stockage profond**
 - transmuter les PF ... → on ne sait pas faire
- **réduction de la charge thermique** des déchets
 - transmuter les PF ? ... on ne sait pas faire !
 - entreposer 100 ans avant stockage
 - transmuter l'Am et le Cm

QUAND TRANSMUTER ?

- réduction de la charge thermique des colis → **~ 80 ans d'entreposage**

- 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 << combustibles usés



Transmuter => faire durer le nucléaire ...

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 α de ^{241}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
- $^{243}\text{Cm} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ ($T_{1/2} = 29$ ans)
- $^{244}\text{Cm} \rightarrow ^{240}\text{Pu}$ ($T_{1/2} = 18$ ans)

DEUX TYPES DE SCÉNARIOS

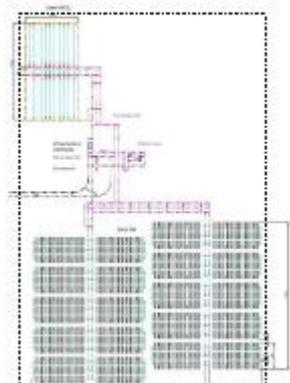
Transmutation de tous les actinides mineurs

Transmutation de l'Am seul

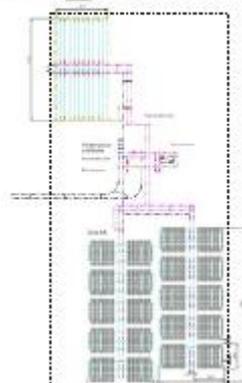
Après 70 ans d'entreposage ...

	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	$4.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$3.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$	$3.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

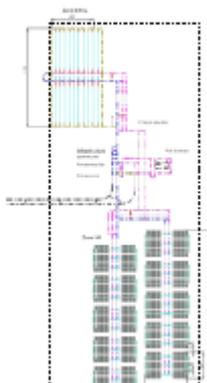
Sans transmutation
entreposage : 70 ans



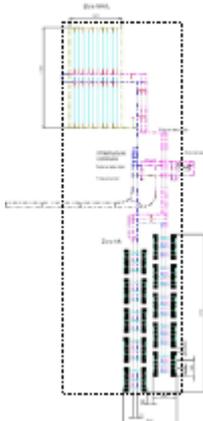
Transmutation Am seul
entreposage : 70 ans



Transmutation AM
entreposage : 70 ans



Transmutation AM
entreposage : 120 ans



Rapport d'étape
réalisé en vue de la
préparation du
rapport 2012



énergie atomique - énergies alternatives

CEA/ENVI/SNACF
DO 38 29/09/10



10.11.F000007

diffusé le : 29/09/10

	Sans transmutation RNR	Avec transmutation tous AM	Avec transmutation Am seul
$P_{\text{thermique}}$ (W/kg)	1,5	9 à 160	3 à 7
Emission neutronique (relatif)	1	120 à 3500	3,7 à 3

Rapport d'étape
réalisé en vue de la
préparation du
rapport 2012



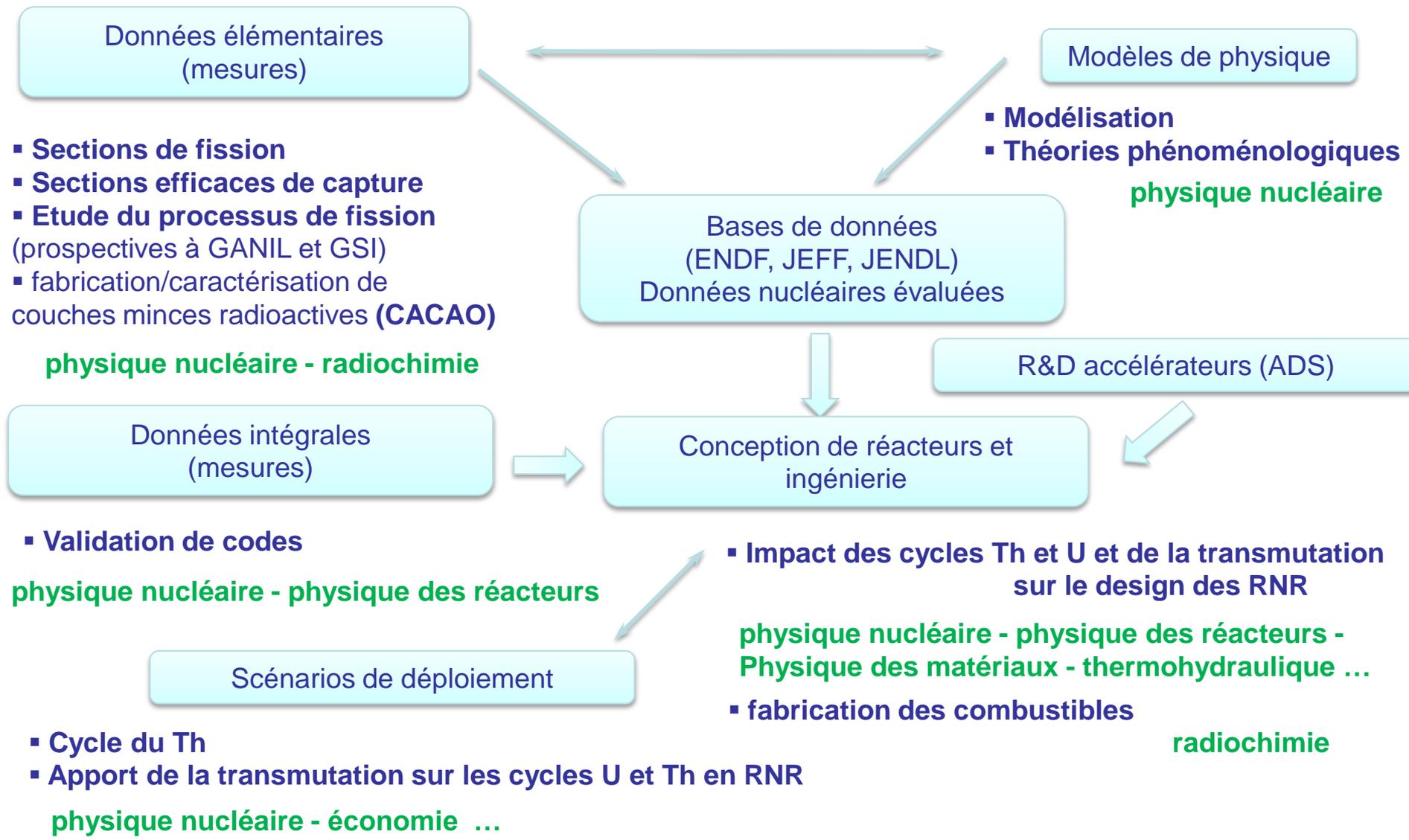
énergie atomique • énergies alternatives

CEA/IND/SNACF
DO 38 29/09/10



10/11/F0000007

diffusé le : 29/09/10



PRINCIPE D'UN ADS: Accelerator Driven System

Actinides mineurs : peu de neutrons retardés produits

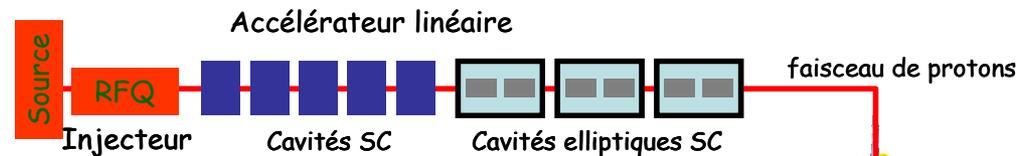
→ problème potentiel pour la sureté du réacteur

→ utilisation d'un réacteur sous critique

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

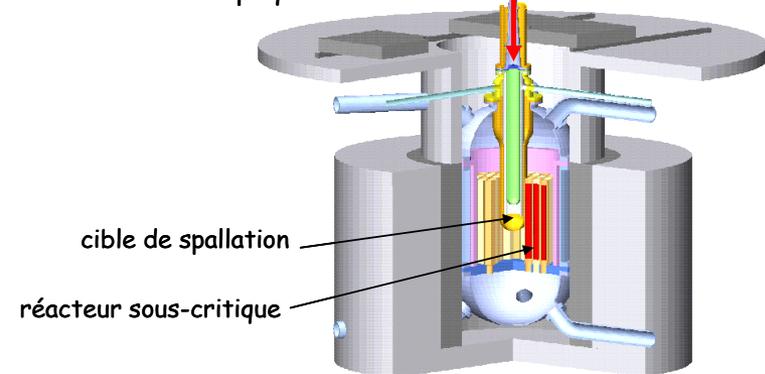
→ Pilotage du réacteur par un faisceau de neutrons produit par un accélérateur

POSSIBILITÉ DE « CHARGER » LE RÉACTEUR EN ACTINIDES MINEURS



Réaction de spallation :

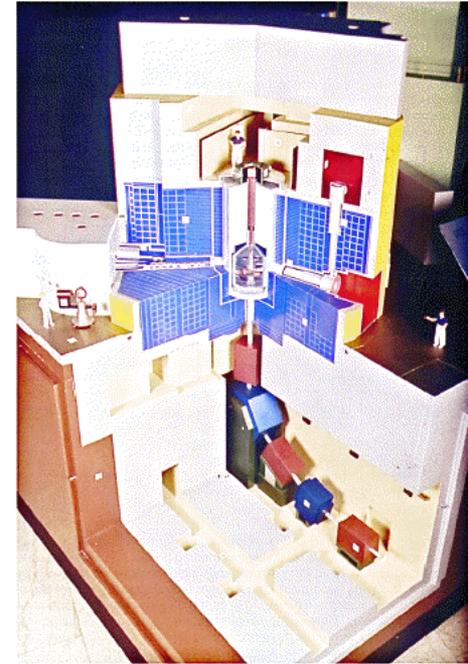
1 proton de 1 GeV d'énergie cinétique produit environ 30 neutrons lorsqu'il frappe une cible épaisse de noyaux lourds (Pb, Pb-Bi, W, ...)



LA CIBLE: MEGAPIE (MEGAwatt Pilot Experiment)

Collaboration CEA, FZK, PSI, CNRS, ENEA, SCK-CEN, JAERI, DOE, KAERI

- irradiation (Août-Décembre 2006) d'une cible de
 Pb-Bi liquide (920 kg) ; $E_p = 575 \text{ MeV}$, $I_p = 960 \text{ A}$
- tenue des matériaux sous irradiation
 - production de neutrons



LA CIBLE: MEGAPIE (MEGAwatt Pilot Experiment)

COUPLAGE RÉACTEUR – SOURCE DE NEUTRONS:

MUSE (MUltiplication d'une Source Externe)

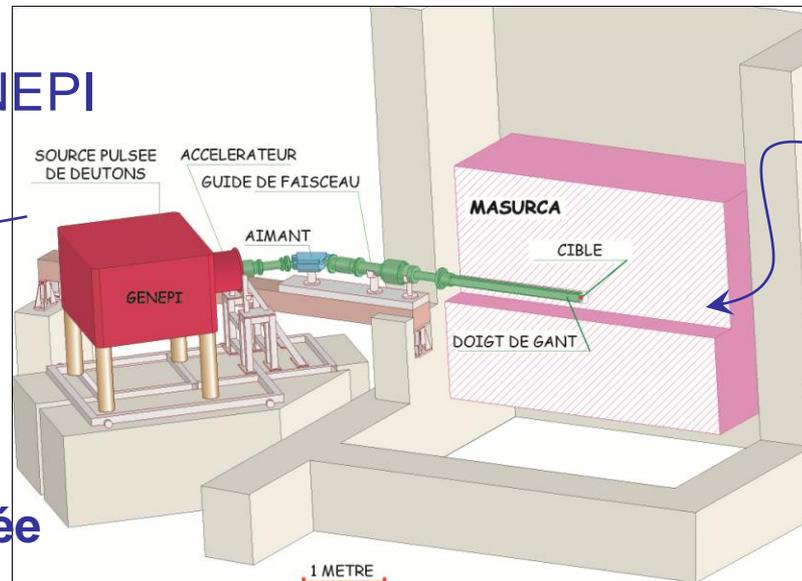
Collaboration CEA/DEN – IN2P3 ; ~ 2000 - 2004

- étude du couplage à faible nulle et sans effets thermiques
- séparer la source de neutron de la physique du cœur sous-critique
 - caractérisation du cœur (k , distribution du flux de neutrons, ...)
 - développement de techniques de mesure de la réactivité

Source de neutron GENEPI
(IN2P3/LPSC)
 $T(d,n)^3\text{He}$



Source pulsée



Réacteur MASURKA
CEA/DEN/Cadarache

LA CIBLE: MEGAPIE (MEGAWatt Pilot Experiment)

COUPLAGE RÉACTEUR – SOURCE DE NEUTRONS:

MUSE (**M**ultiplication d'une **S**ource **E**xterne)

VERS UNE VALIDATION EXPÉRIMENTALE « EN CONDITIONS REPRÉSENTATIVES »:

GUINEVERE

(**G**enerator of **U**ninterrupted Intense **N**eutron at the lead **V**enus **R**eactor)

Collaboration SCK-CEN (réacteur VENUS), CNRS (source de neutrons), CEA (combustible)

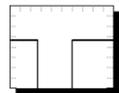
EUROTRANS (FP6) et FREYA (FP7 - **F**ast **R**eactor **E**xperiments for **h**ybrid **A**pplications)

→ mesures de référence en régime critique

→ régime sous-critique ($k_{\text{eff}}=0,97$)



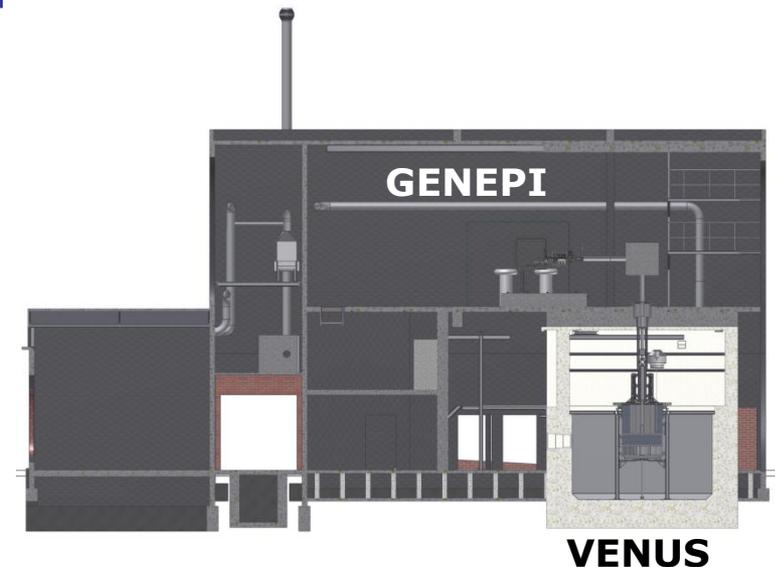
- relation courant-puissance en régime continu



- mesure de réactivité en régime de « beam trip »



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



LA CIBLE: MEGAPIE (MEGAwatt Pilot Experiment)

COUPLAGE RÉACTEUR – SOURCE DE NEUTRONS:

MUSE (MUltiplication d'une Source Externe)

VERS UNE VALIDATION EXPÉRIMENTALE « EN CONDITIONS REPRÉSENTATIVES »:

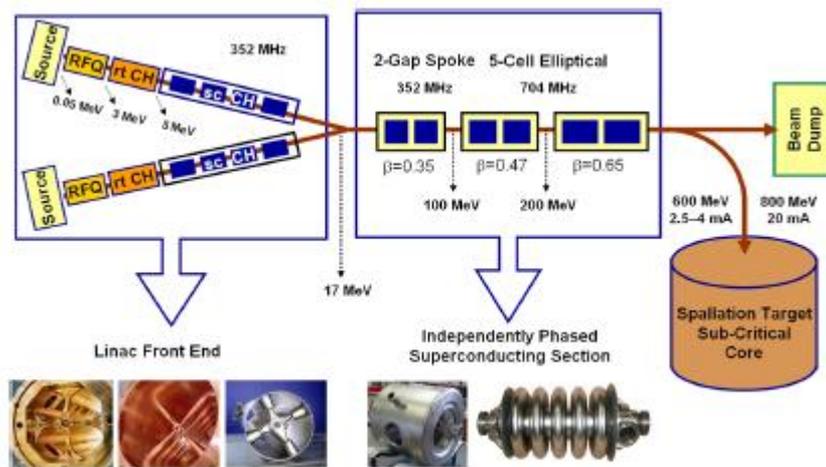
GUINEVERE

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

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 sujets non abordés ... faute de temps

- le conditionnement des déchets et des colis - vieillissement des conteneurs
- le transport des matières radioactives
- l'assainissement des sites contaminés
- le détail du retraitement
 - ✓ l'usine de la Hague
 - ✓ le centre ATALANTE (ATelier Alpha et Laboratoires pour Analyses)
- le cycle du Thorium

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 PACEN : <http://pacen.in2p3.fr/>
- stockage profond: <http://lpsc.in2p3.fr/gpr/french/Stockage/stockage.htm>
- <http://sfp.in2p3.fr/> débats - l'énergie au XXIème siècle – énergie nucléaire