
Energie Nucléaire

Présent et Perspectives

Sylvain DAVID

CNRS

Institut de Physique Nucléaire

sdavid@ipno.in2p3.fr

01 69 15 69 52

Energie Nucléaire

Présent et Perspectives

Contexte énergétique

Nucléaire de fission - Principe de base

Contexte nucléaire actuel

Gestion des déchets

Nucléaire du futur : Surgénération & génération 4

Contexte énergétique : présent

Consommation mondiale (2000)

Source	(GTeP/an)
Fossiles	8.0
Pétrole / gaz / charbon	3.7 / 2.1 / 2.2
Biomasse Traditionnelle	1.2
Hydraulique	0.7
Nucléaire	0.6
Nouveaux renouvelables (solaire, éolien, biomasse)	0.02
Total	10.5
Rejets CO ₂ (GTC)	6

Contexte énergétique : juste un mot sur les unités...

Quelles unités pour mesurer l'énergie ?

- Physique :

[Energie] = Joule (J) ; [Puissance] = Watt (W) = J/s

processus élémentaire chimique eV = $1.6 \cdot 10^{-19}$ J

processus élémentaire nucléaire MeV = 1 million d'eV

- Particulier

Electricité [Energie] = kWh = $1000 \cdot 3600 = 3.6$ MJ

Transport [Energie] = litres d'essence / 100 km

[Puissance] = cheval vapeur = 735 W (!!!)

- Industriels

Electricité [Energie] = TWh, TWh/an, ...

Pétrole [Energie] = « Barils »

- Alimentation

[Energie] = calorie = 4.18 J ou 4180 J (!?)

- Economistes

[Energie] = TeP Tonne Equivalent Pétrole

- Explosifs

[Energie] = kilos, tonnes de TNT

-

Contexte énergétique : juste un mot sur les unités...

	Milliards de Joules	TeP
Pétrole (1t)	42	1
Essence (1t)	44	1.05
Charbon (1t)	17-32	0.4-0.75
Bois (1 stère)	6.17	0.147

Ça se complique pour l'électricité à cause du rendement thermique

- Avant 2002, on calculait la masse de pétrole qu'il fallait pour produire une quantité donnée d'électricité (logique...) : **1 MWh = 0.222 TeP**

- Et maintenant...

$E(\text{électrique}) = E(\text{thermique}) * \text{Rendement}$

Nucléaire : $1 \text{ MWh} = 3.6 \text{ GJ} = 3.6 / 42 / 0.33 = \mathbf{0.26 \text{ TeP}}$

Géothermie $1 \text{ MWh} = 3.6 \text{ GJ} = 3.6 / 42 / 0.1 = \mathbf{0.86 \text{ TeP}}$

Autres sources / import. export. / consommation

$1 \text{ MWh} = 3.6 \text{ GJ} = 3.6 / 42 = \mathbf{0.086 \text{ TeP}}$

Contexte énergétique : ordres de grandeur

• Dans le monde

Consommation totale (2000)	10 milliards de tep /an
Consommation / hab	1.6 tep/an
Dont électricité / hab	250 W

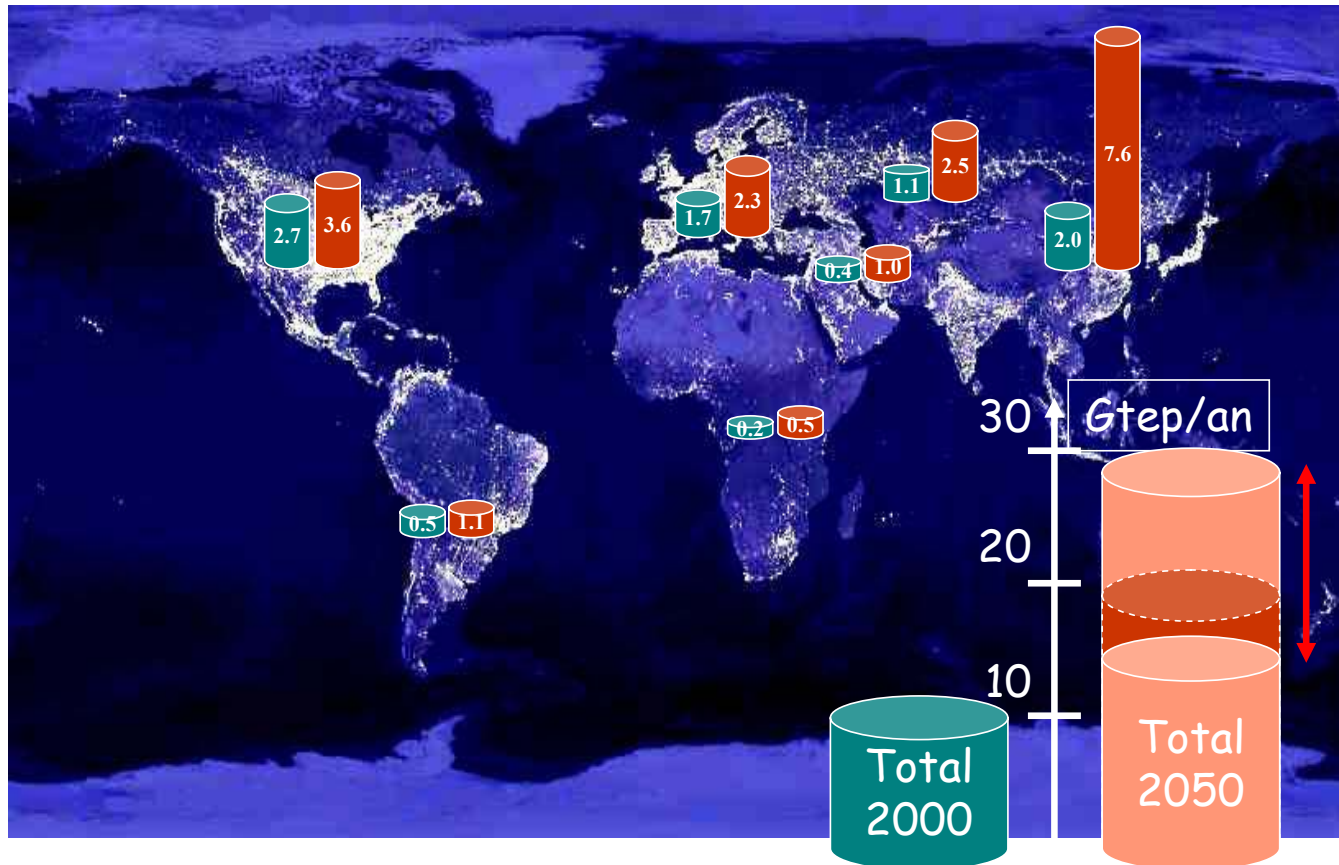
• En France

Consommation / hab	3.8 tep / an
Dont chaleur	1.2 tep/an
transport	0.9 tep/an
électricité	1000 W en permanence

• En Chine

+ un parc électrique français chaque année

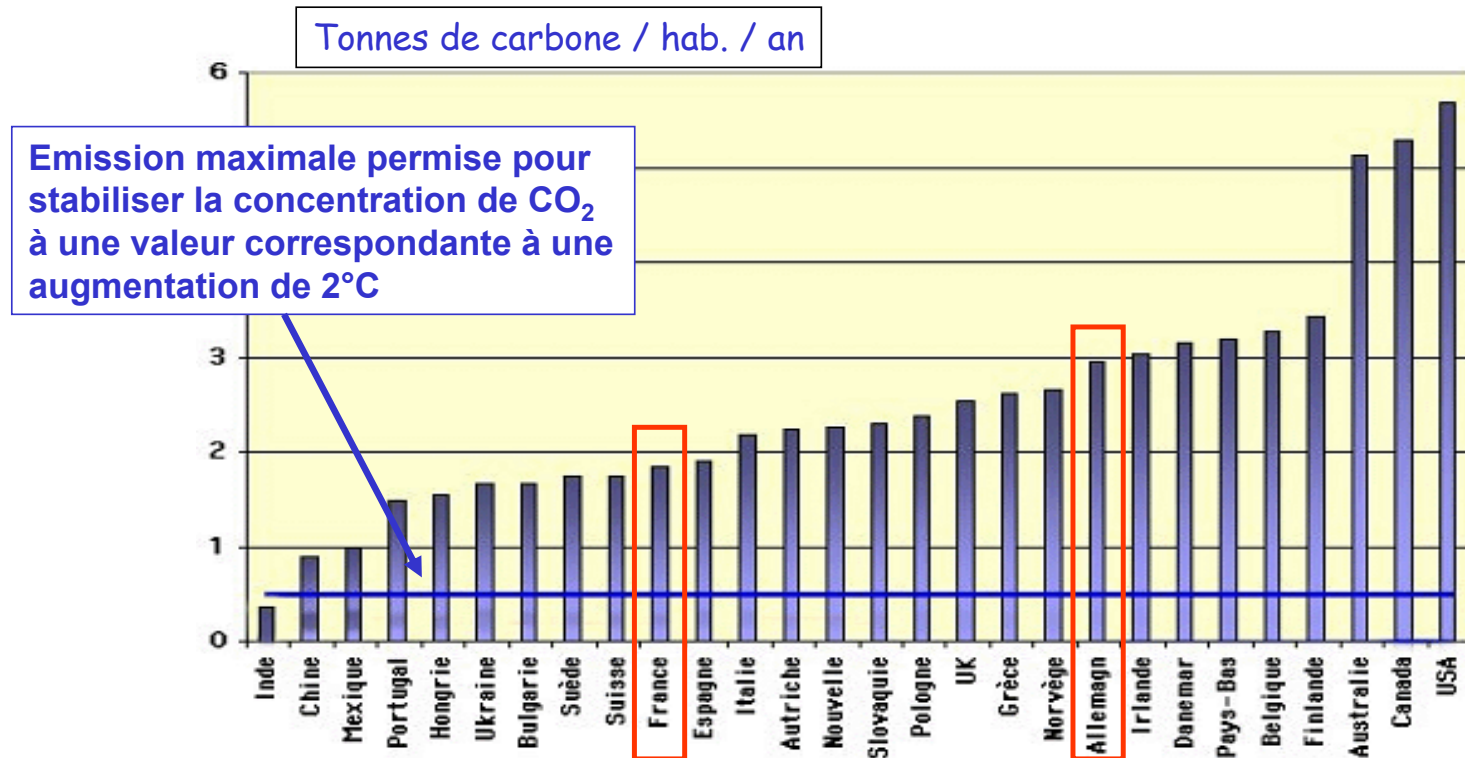
Contexte énergétique : présent et futur



Contexte énergétique : effet de serre

Réduire les émissions de gaz à effet de serre

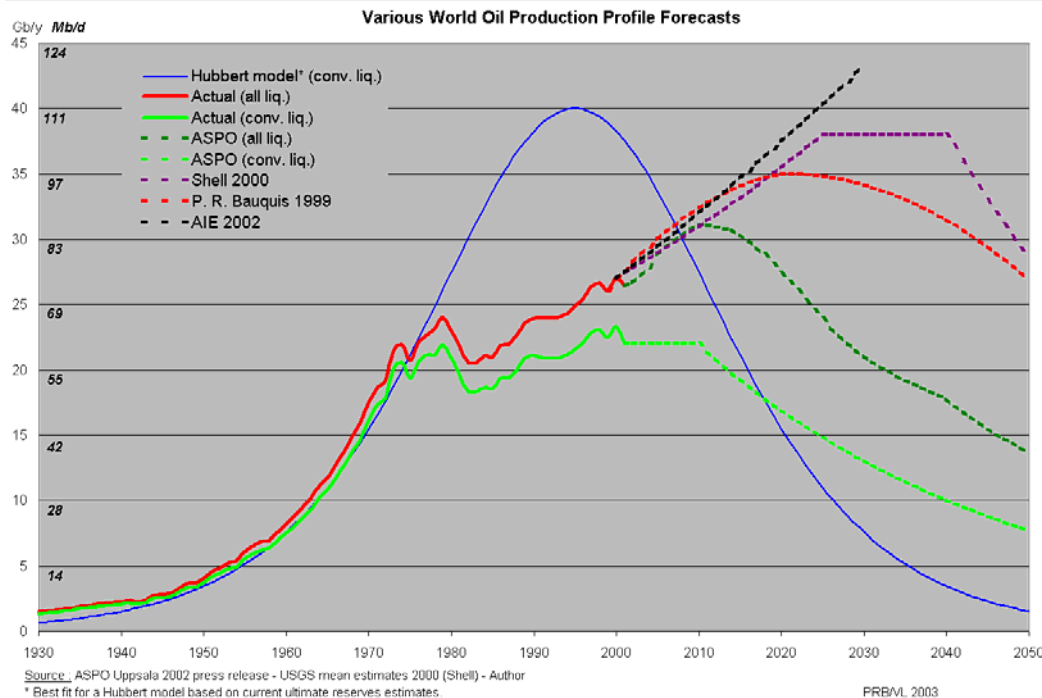
Valeur à atteindre pour 6 milliards d'habitant ≈ 500 kg / an / hab



Ref: JM Jancovici, www.manicore.com

Contexte énergétique : réserves de pétrole

De grandes incertitudes sur les réserves de pétrole...



Réf: PR Bauquis – Total
Prof. Associés

Localisation: Arabie Saoudite, Irak, Koweït, Iran, ...

Le casse tête énergétique du XXI^{ème} siècle

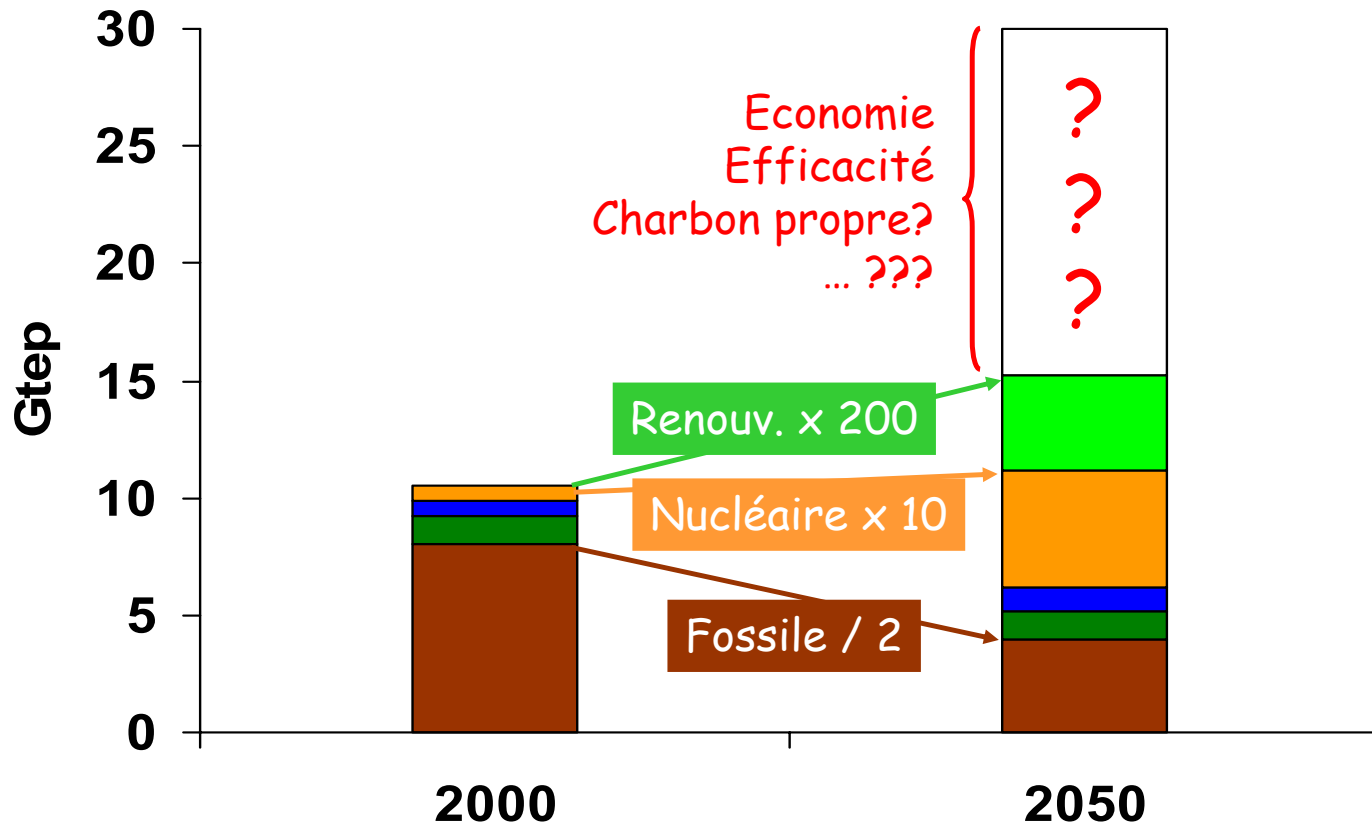
La consommation d'énergie va
significativement augmenter

Mais la consommation des combustibles
fossiles doit significativement diminuer :

- Le changement climatique
- Les réserves limitées (pétrole pas cher et gaz)

Contexte énergétique : présent et futur

Les ordres de grandeur

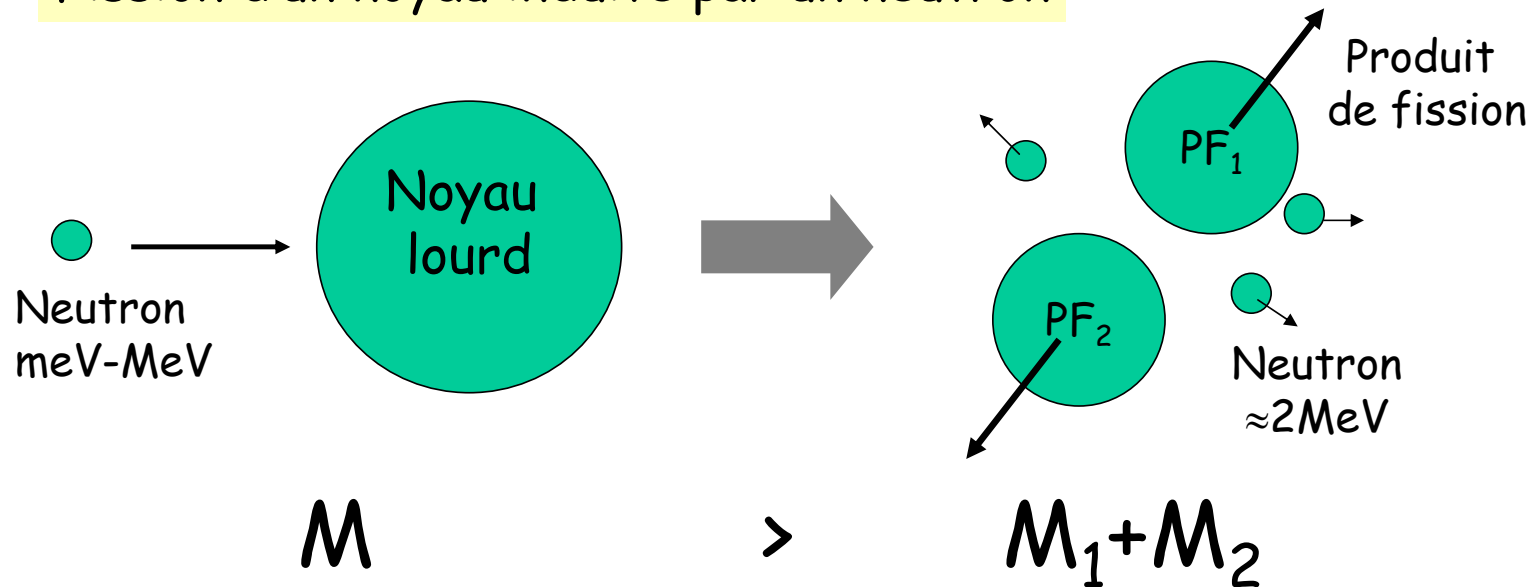


L'énergie nucléaire

Principes de base

Nucléaire : principe de base

Fission d'un noyau induite par un neutron



$$\Delta M = 200 \text{ MeV}/c^2$$

Nucléaire : principe de base

Fission

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

Gaz naturel



1 personne en France consomme (électricité)
 $\approx 1000 \text{ W} = 9000 \text{ kWh/an} = 32 \text{ GJ/an}$

$$\rightarrow 32 \cdot 10^9 / 3,2 \cdot 10^{-11} = 10^{21} \text{ fissions} = 0.39 \text{ grammes}$$

$$\rightarrow 32 \cdot 10^9 / 1,3 \cdot 10^{-18} = 4,1 \cdot 10^{28} \text{ molécules} = 1 \text{ tonne}$$

L'énergie nucléaire est une énergie très concentrée

Intérêt stratégique (stockage facile...), économique, environnement, ...

Nucléaire : principe de base

La fission produit de l'énergie, mais aussi des neutrons
⇒ réaction en chaîne possible

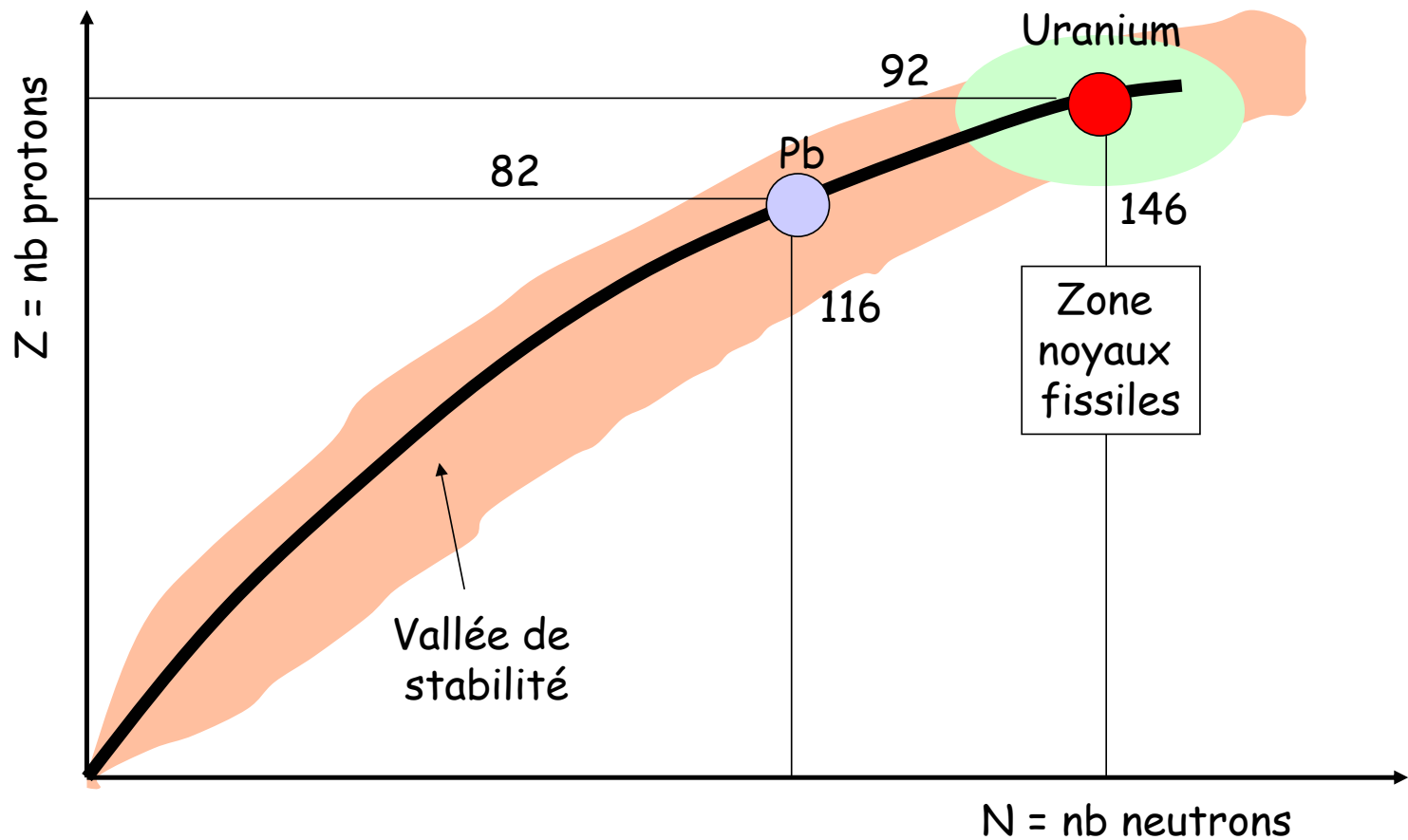
$$k = \frac{\text{Nb neutrons produits}}{\text{Nb neutrons absorbés}}$$

Si $k < 1$, la réaction en chaîne ne s'entretient pas
elle s'arrête après avoir produit $1/(1-k)$ neutrons

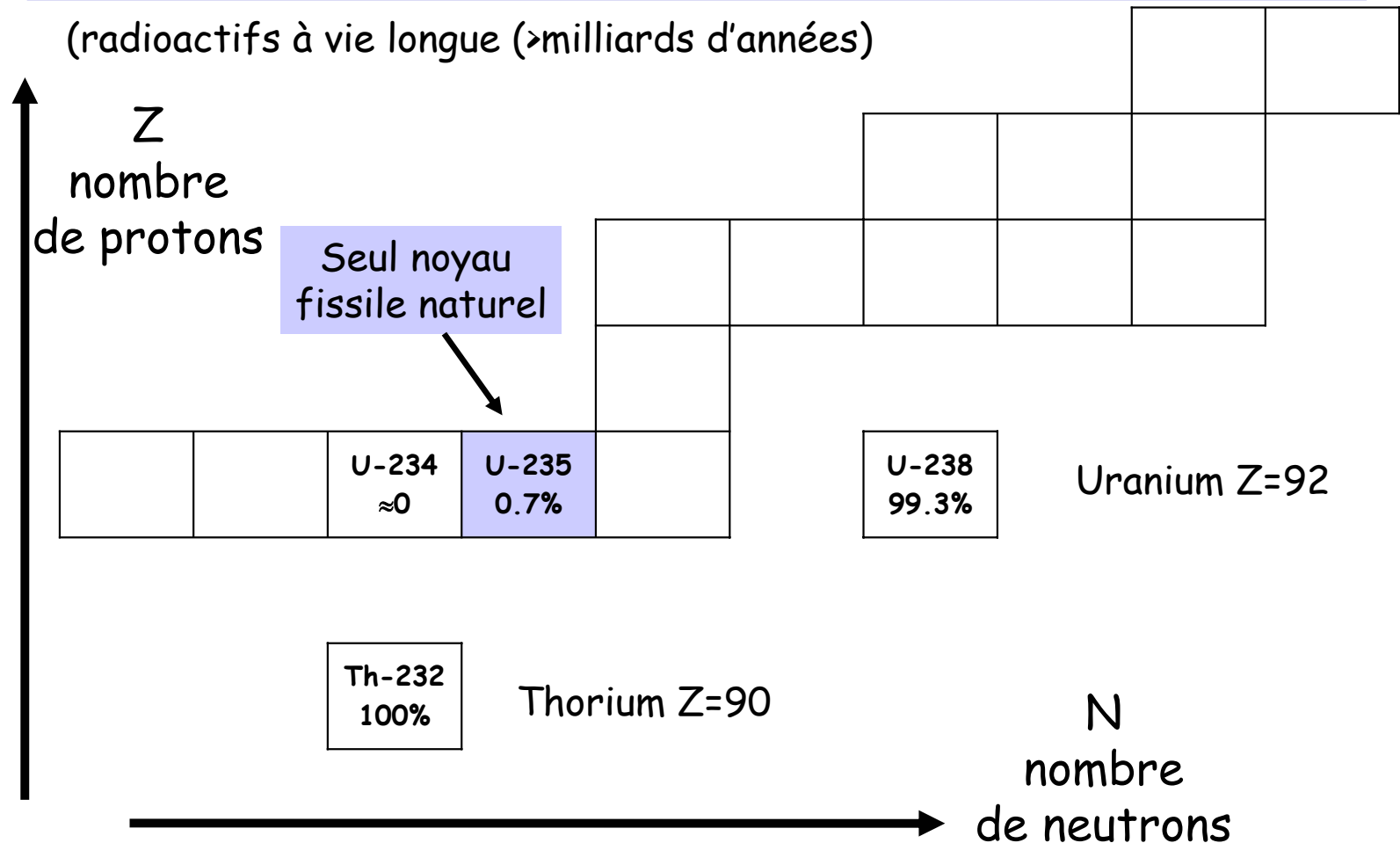
Si $k > 1$, la réaction diverge (principe des bombes à fission)

Si $k=1$, la réaction en chaîne s'entretient d'elle même
principe d'un réacteur critique

Nucléaire : principe de base



Nucléaire : principe de base



Nucléaire : principe de base

Les neutrons émis par fission ont une énergie de 2 MeV

Pour favoriser les fissions de ^{235}U par rapport aux captures de ^{238}U , il faut ralentir les neutrons à $E < 1\text{eV}$ (spectre thermique)

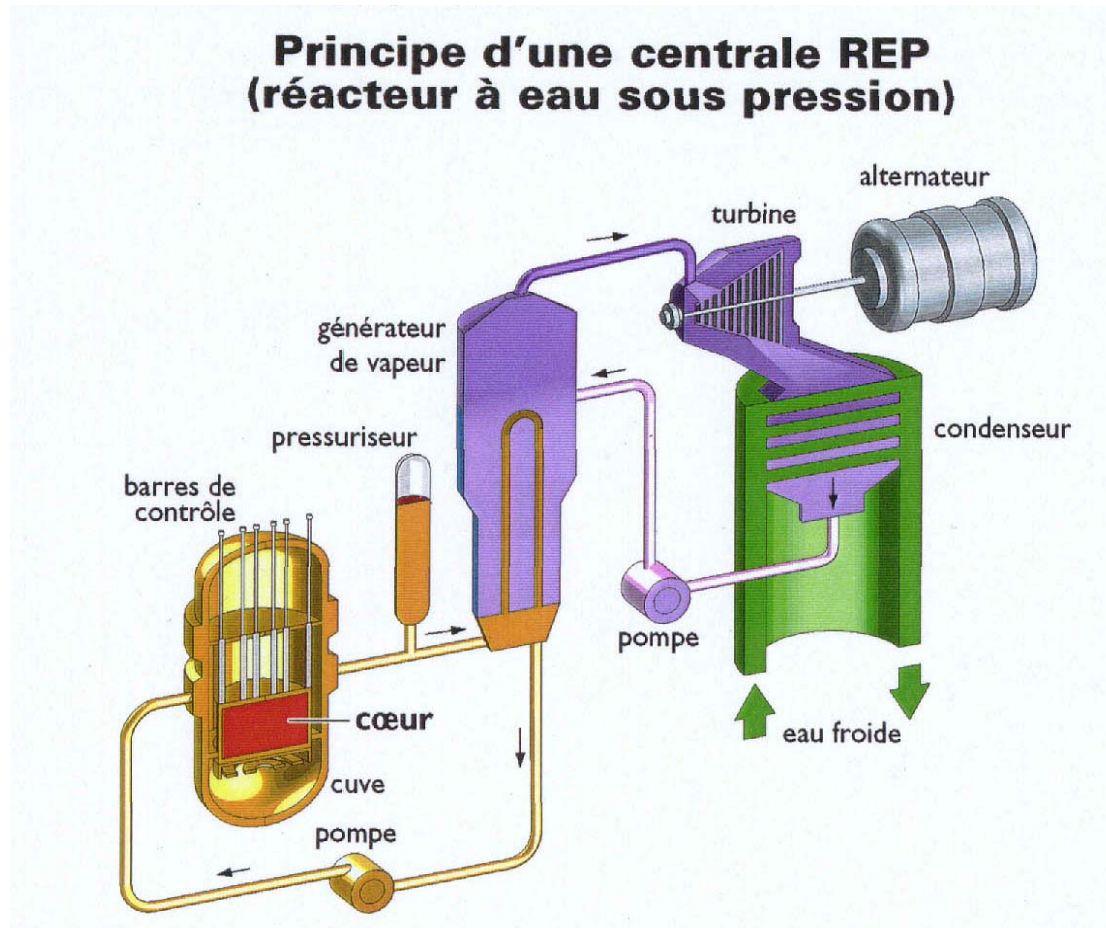
Uranium naturel
0.7% ^{235}U

Modérateur peu capturant
=
Eau lourde (filière Candu)
Graphite (filière UNGG)

Uranium enrichi
3.7% ^{235}U

Modérateur
=
Eau légère
• Sous pression (REP)
• Bouillante (REB)

Nucléaire : principe de base



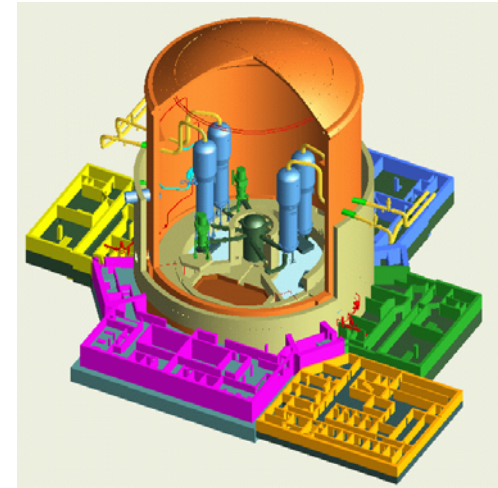
Les réacteurs de génération 2 et 3 fonctionnent sur ce principe



REP: Réacteur à Eau Pressurisée

Génération 2

Uranium enrichi à 3.7% en ^{235}U



EPR: European Pressurized Reactor

Génération 3

Evolution des REP

Sûreté et compétitivité économique

L'énergie nucléaire

Contexte actuel

Nucléaire : contexte actuel

La situation dans le monde

300 GWe

20% de la production électrique

USA 22%, Japon 27%, Allemagne 29%, UK 25%, Canada 20%

6% de la consommation totale d'énergie

La situation en France

60 réacteurs

60 GWe installés, 400 TWhé/an

75% de la production d'électricité

25% de la consommation totale d'énergie

Consommation d'Uranium (filière type REP)

	/(GWe.an)
fissionné	1 t
enrichi	30 t
naturel	200 t

La consommation d'Uranium peut être réduite dans les réacteurs standards sans modification majeure

- réduction des rejets d' ^{235}U dans l'Uranium appauvri
- augmentation du burn-up
- retraitement et ré-enrichissement de l'uranium irradié

La consommation minimale d'Uranium est de l'ordre de 100t/GWe.an

Nucléaire : contexte actuel

Réserves d'Uranium

	millions of tons
Réserves prouvées	
< 80\$/kg	2.5
< 130\$/kg	4.4
Ressources ultimes estimées	
AIEA	16
Extrapolation linéaire « reserves vs. prix » à 400\$/kg (ref JF. Luciani, CEA)	23

Si on se base uniquement sur des critères économiques » :
Limite 400\$/kg : les réacteurs à neutrons rapides deviennent compétitifs
économiquement face aux REP

Nucléaire : contexte actuel

Potentiel des filières standards

Production nucléaire mondiale	285 GWe (équivalent pleine puissance)
Consommation mondiale d'U nat	60000 t/an
Réserves U (RRA+RSE+spéculatives)	16-23 millions of tons
Potentiel de production	
- au taux actuel (et utilisation actuelle de U)	280 - 400 years
- scénario « nucléaire x 10 » et optimisation de l'utilisation de l'U nat en REP	≈ 50 - 80 years

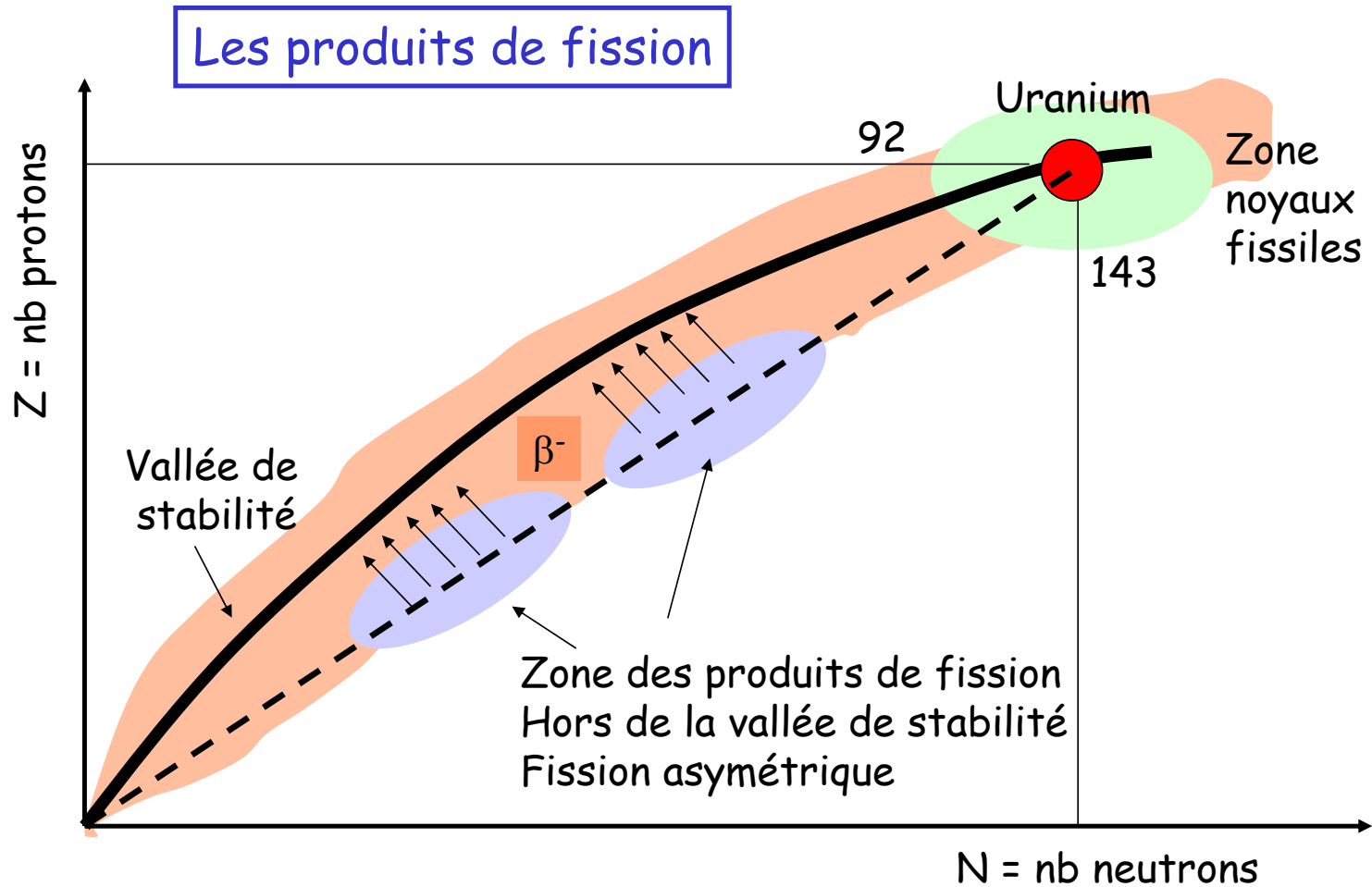
- Les réacteurs standards ne sont pas durables si le nucléaire se développe massivement dans ce siècle
- Dans ce cas, la transition vers des réacteurs surgénérateurs devient indispensable avant la fin du siècle
- Si on prend en compte d'autres arguments (déchets, prolifération, etc...) les surgénérateurs peuvent être déployées plus tôt

L'énergie nucléaire

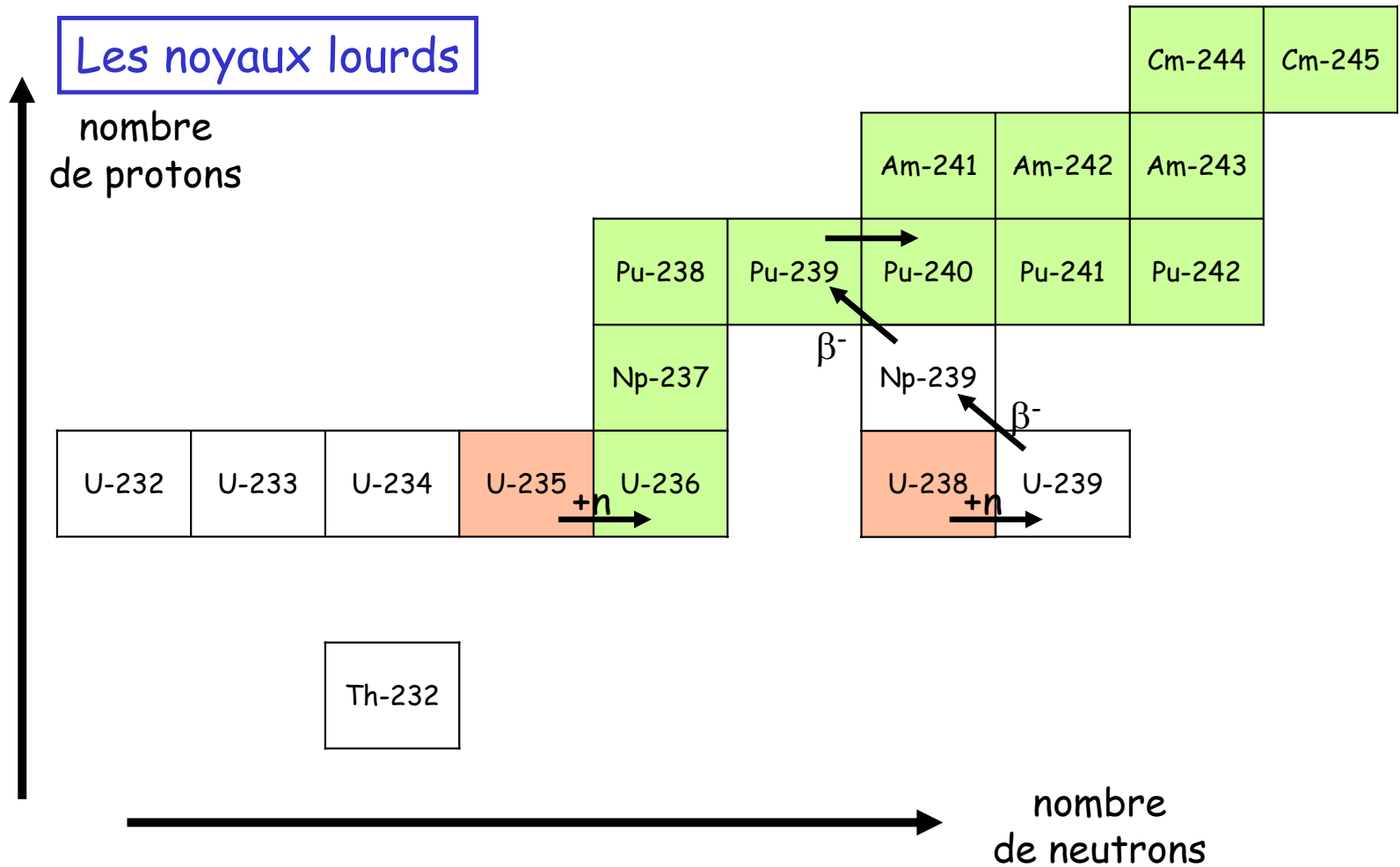
Aval du cycle

Le cas français

Nucléaire : aval du cycle

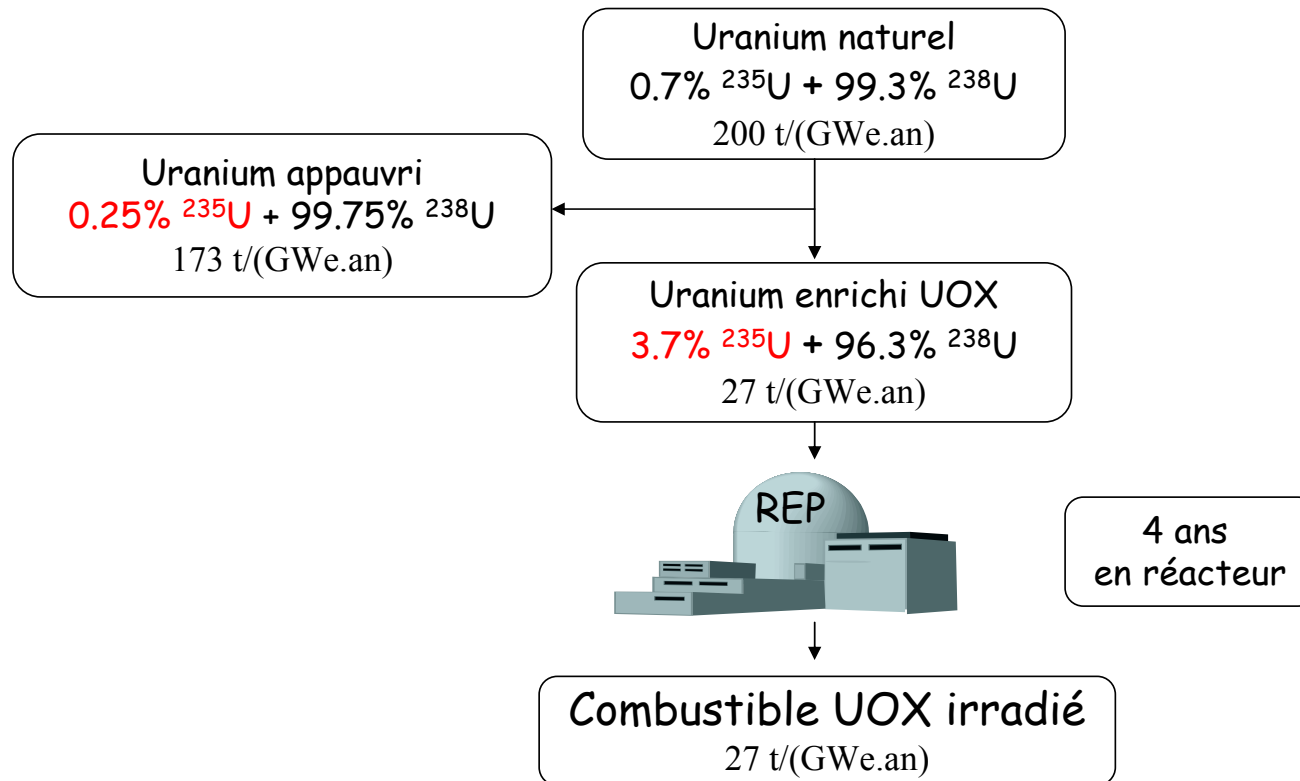


Nucléaire : aval du cycle



Nucléaire : contexte français actuel

Les réacteurs actuels sont des REP : Réacteurs à Eau sous Pression
Fonctionnement à l'uranium enrichi



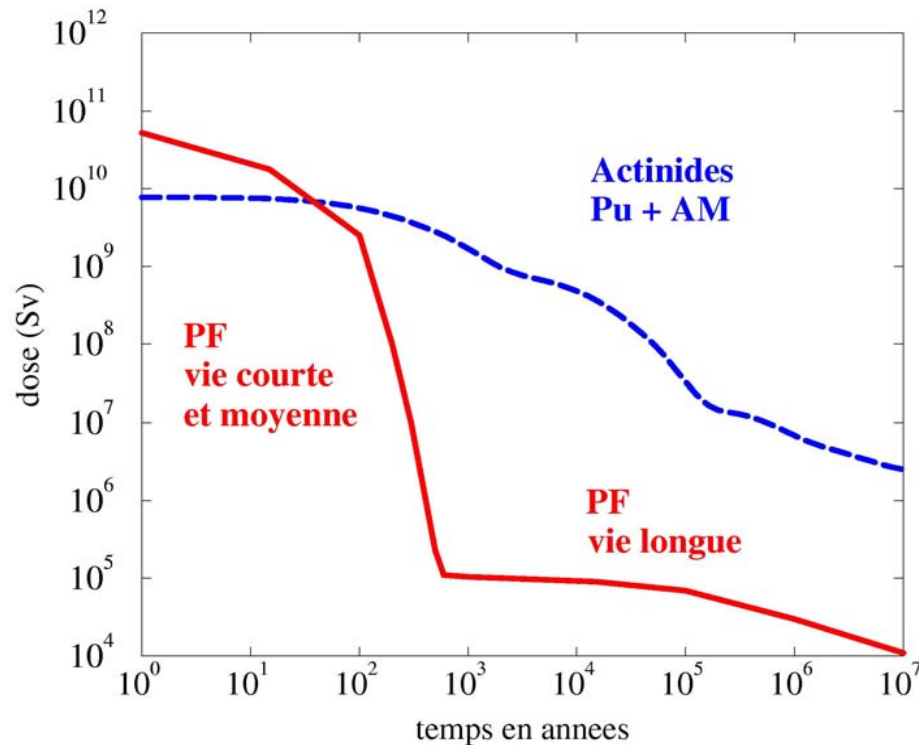
Nucléaire : aval du cycle

Production d'un REP de 1GWe chaque année
(1/3 de cœur après 3 ans d'irradiation)

	t=0	t=3 ans
^{238}U	26328	25655
^{235}U	954	280
^{236}U	-	111
^{239}Pu	-	156
Pu tot	-	266
Am, Cm	-	20
PF vie moyenne ^{137}Cs , ^{90}Sr (≈ 30 ans)	-	43
PF vie longue ($\approx 10^{5-6}$ ans)	-	63
PF total	-	946

Nucléaire : aval du cycle

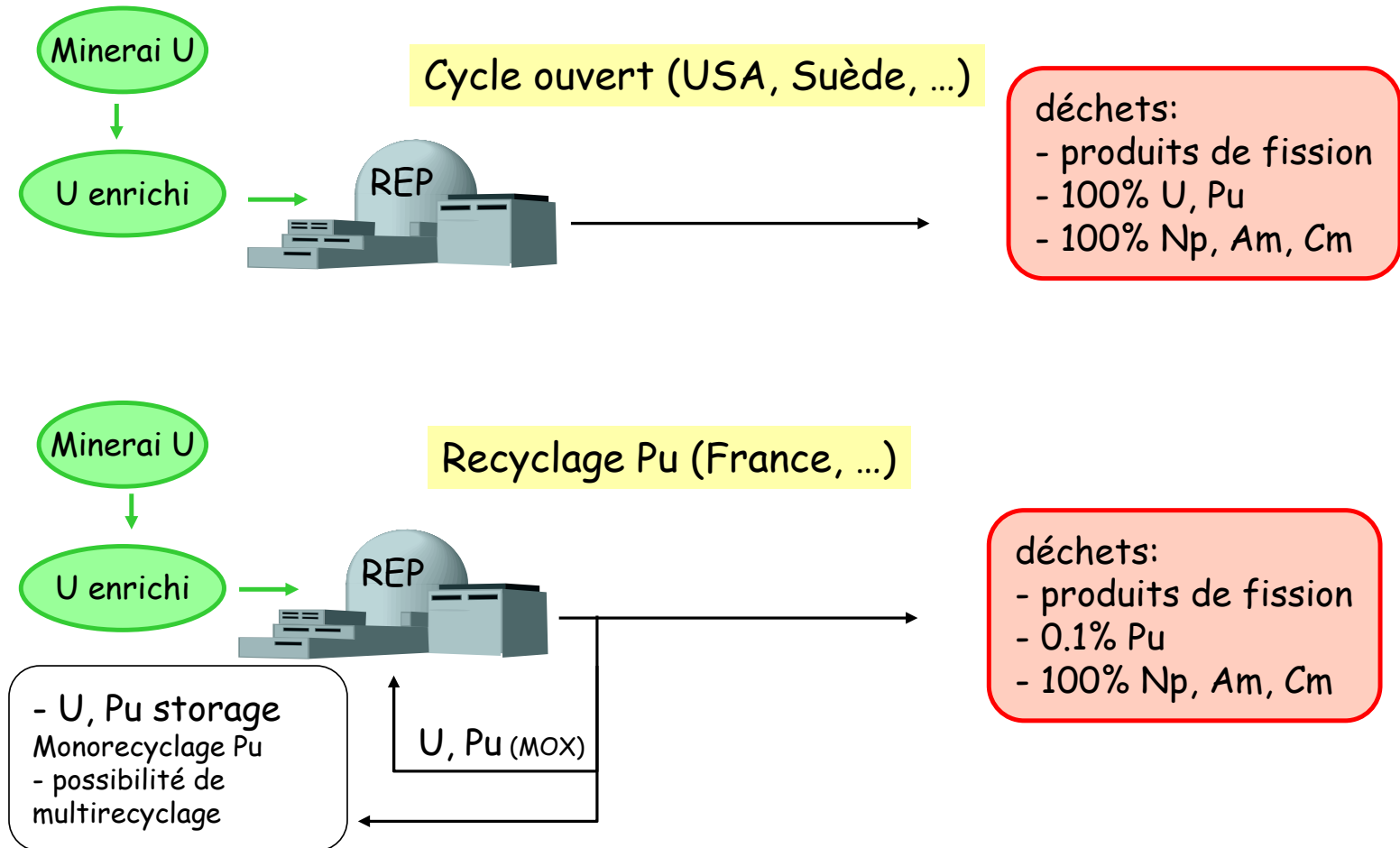
La radiotoxicité mesure le risque encouru lors de l'ingestion d'un noyau
Unité : le Sievert (Sv)



La radiotoxicité dépend

- du type de particule émise
- de son énergie
- du temps de résidence du noyau dans le corps
- de ses sites de fixation
- Etc...

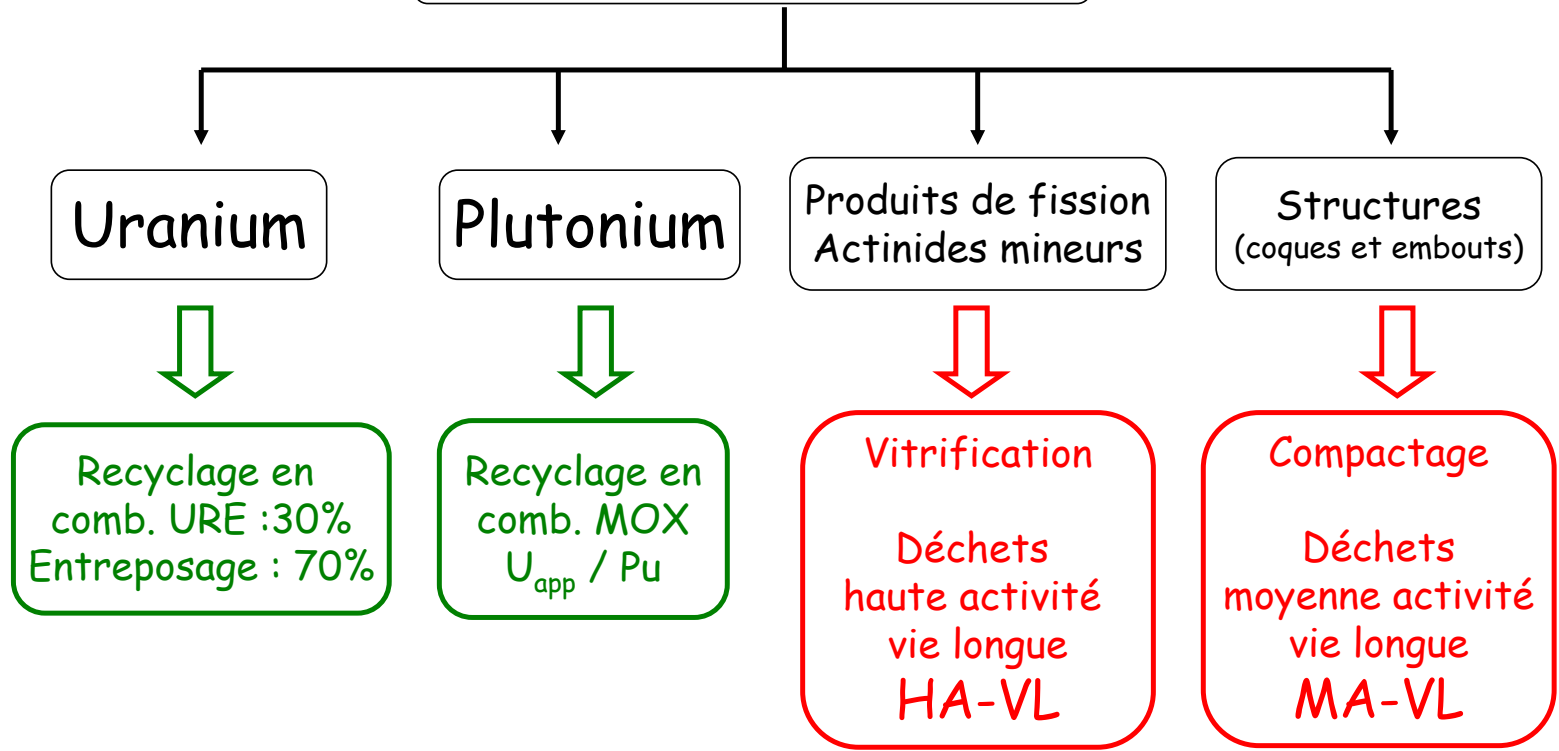
Nucléaire : aval du cycle



Nucléaire : contexte français actuel

Le retraitement

Combustible UOX irradié

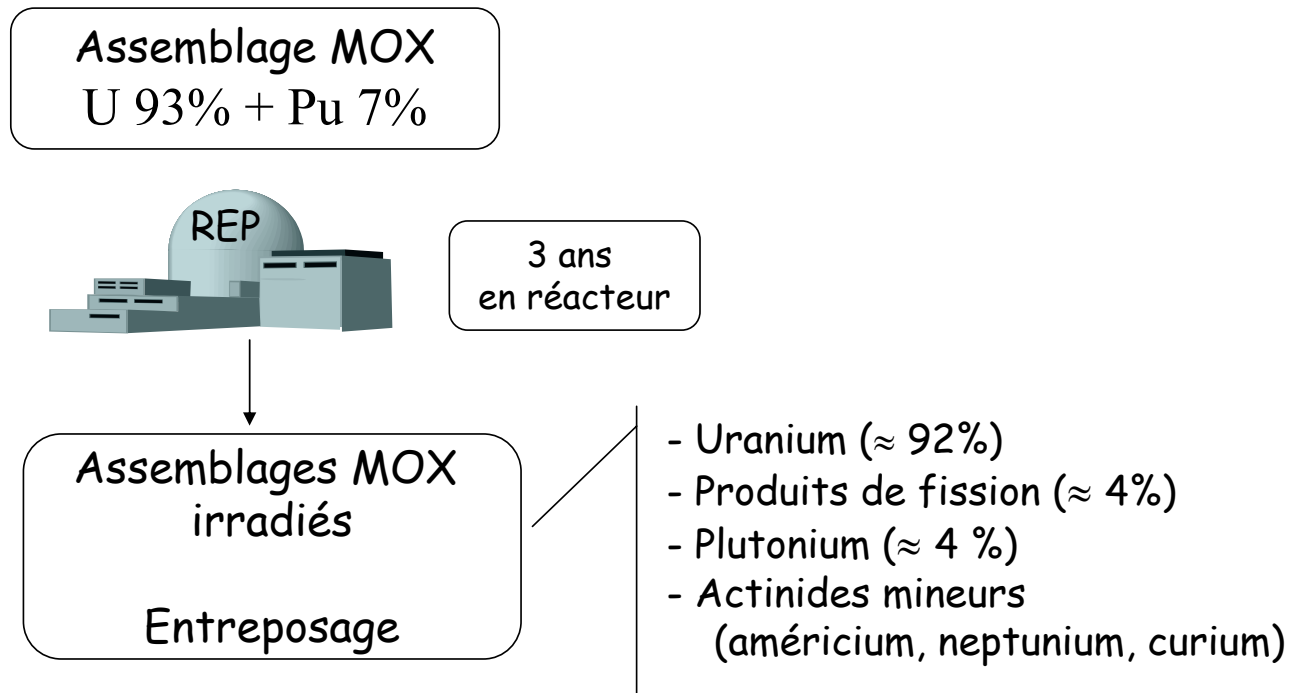


Nucléaire : contexte français actuel

Utilisation des MOX

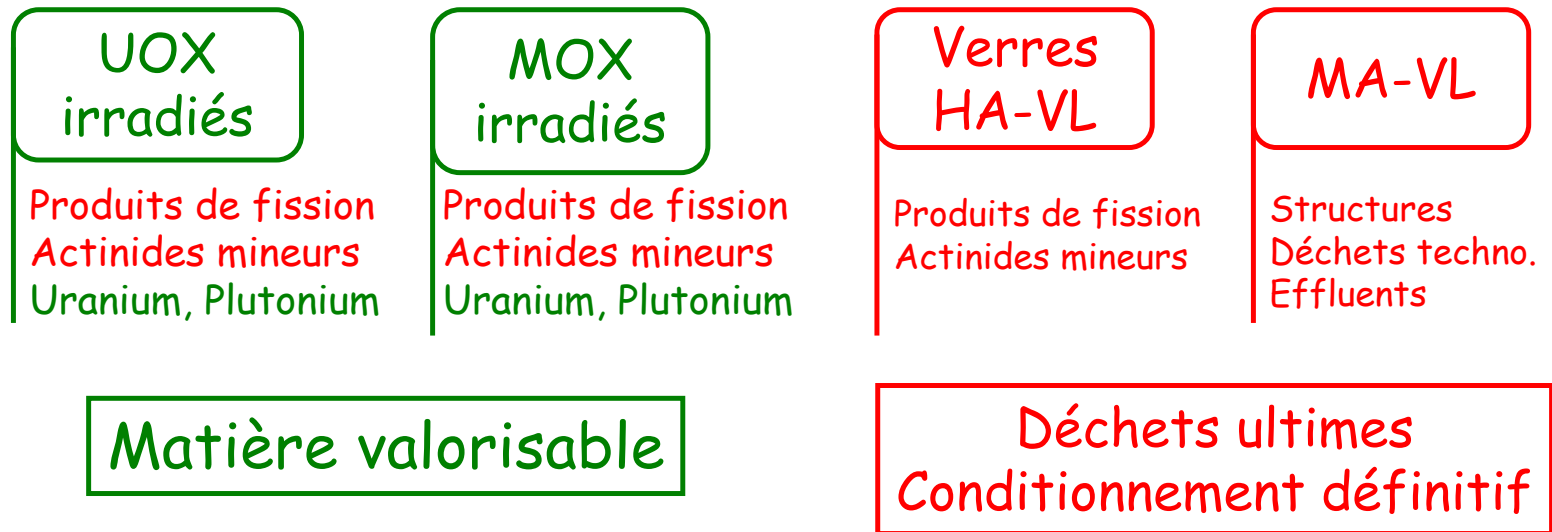
Fonctionnement au combustible UOX (70%) + MOX(30%)

⇒ 20 réacteurs (900 MWe) du parc



Nucléaire : contexte français actuel

Distinction déchets / matière valorisable



La notion de « déchets » dépend du futur envisagé et de la stratégie choisie (retraitement ou non)

Nucléaire : contexte français actuel

Etat des lieux fin 2002
d'après inventaire Andra 2002

Déchet
ultimes

HA-VL (verres)	1600 m ³
MA-VL - parc REP	29000 m ³
- autres	16000 m ³
Uranium appauvri	220 000 t
retraitement	16 000 t
UOX usés	10500 t
MOX usés	520 t

Matière
valorisable

Produits
de fission
850 t

Actinides
mineurs
28 t

Plutonium
130 tonnes
(+90 t usines)

Nucléaire : contexte français actuel

Etat des lieux fin 2002
d'après inventaire Andra 2002

Déchet
ultimes

HA-VL (verres)	1600 m ³
MA-VL - parc REP	29000 m ³
- autres	16000 m ³
Uranium appauvri	220 000 t
retraitement	16 000 t
UOX usés	10500 t
MOX usés	520 t

Matière
valorisable

Produits
de fission
850 t

Actinides
mineurs
28 t

Plutonium
130 tonnes
(+90 t usines)

Nucléaire : contexte français actuel

Etat des lieux fin 2002
d'après inventaire Andra 2002

Déchet
ultimes

HA-VL (verres)	1600 m ³
MA-VL - parc REP	29000 m ³
- autres	16000 m ³
Uranium appauvri	220 000 t
retraitement	16 000 t
UOX usés	10500 t
MOX usés	520 t

Matériau
valorisable

Produits
de fission
850 t

Actinides
mineurs
28 t

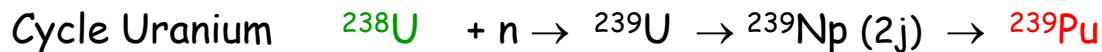
Plutonium
130 tonnes
(+90 t usines)

L'énergie nucléaire

Nucléaire du futur et régénération

Nucléaire : réacteurs régénérateurs

Régénération = produire un noyau fissile par capture neutronique sur un noyau fertile

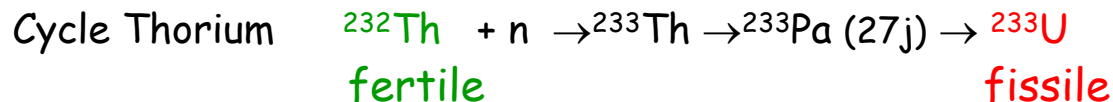


Dans ce cas, tout le minerai est utilisé : 1 tonne / (GWe.an)

Le potentiel des ressources est multiplié par 100

Mais les réacteurs actuels (thermiques) ne peuvent pas être régénérateurs

Et en plus, on peut utiliser aussi le thorium:



Nucléaire : réacteurs régénérateurs

La régénération a besoin de neutrons

Cycle U/Pu en spectre thermique:

3 neutrons produits par fission → 1 produit une nouvelle fission Pu
0.6 capturés sur le Pu
1.6 capturés sur ^{238}U pour régénérer le Pu
TOTAL $3.2 < 3 \Rightarrow$ régénération impossible

Cycle U/Pu en spectre rapide:

3 neutrons produits par fission → 1 produit une nouvelle fission Pu
0.3 capturés sur le Pu
1.3 capturés sur ^{238}U pour régénérer le Pu
TOTAL $2.6 < 3 \Rightarrow$ régénération possible

Cycle Th/U en spectre thermique:

2.5 neutrons produits par fission → 1 produit une nouvelle fission Pu
0.1 capturés sur le Pu
1.1 capturés sur ^{238}U pour régénérer le Pu
TOTAL $2.2 < 2.5 \Rightarrow$ régénération possible

Nucléaire : réacteurs régénérateurs

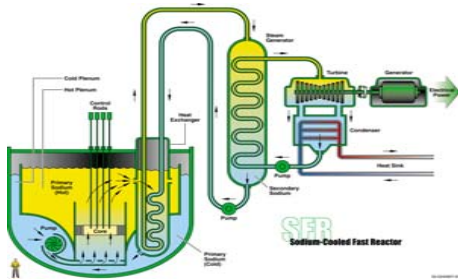
Cycle régénérateur Uranium / Plutonium

Régénération possible avec des neutrons de haute énergie

⇒ Réacteurs à neutrons rapides (RNR)

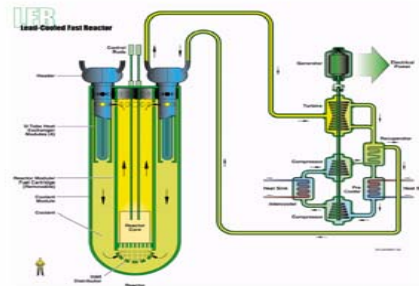
L'eau ralentirait les neutrons, il faut donc un autre fluide pour extraire la chaleur du cœur : Sodium (Superphénix), Plomb, ou gaz (hélium)

Na



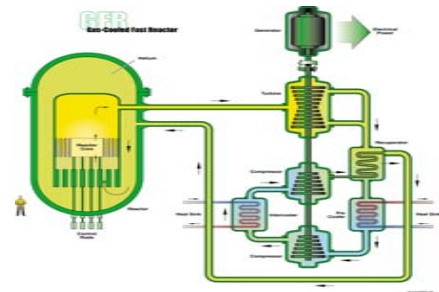
Technologie
« disponible », mais qui
restera complexe

Pb



Pb : corrosion des
matériaux de structure

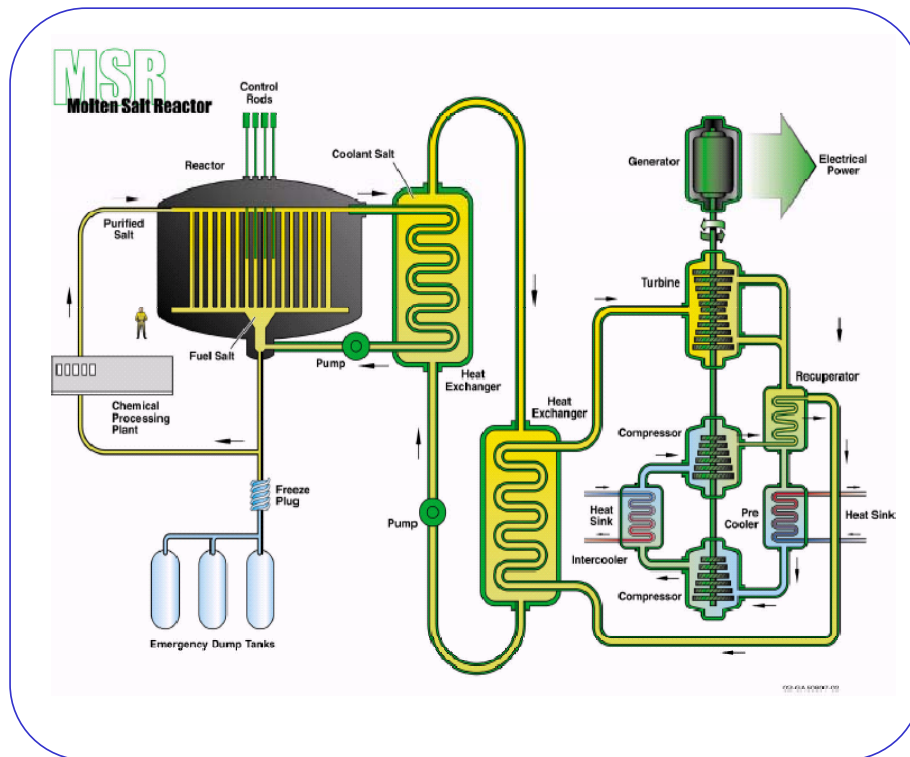
He



Beaucoup de R&D !
Combustible innovant à
trouver

Nucléaire : réacteurs régénérateurs

Alternative au cycle U/Pu régénérateur : réacteur à sels fondus et cycle thorium (thermique ou rapide)



- Sels fluorures
- Combustible = caloporteur
- Retraitement en ligne
- Sûreté très spécifique, ex: pas de risque de fusion du coeur

R&D nécessaire

- Corrosion
- Procédés chimiques

Nucléaire : réacteurs régénérateurs

- Un réacteur régénérateur a besoin de matière fissile pour démarrer
- Une fois démarré il ne consomme plus que du minerai fertile
- Inventaire en matière fissile

Cycle Uranium

Réacteurs à neutrons rapides

$\approx 12 \text{ t de Pu} / \text{réacteur de 1 GWe}$

C'est la masse de Pu produit par un REP en 50 ans !!

La transition REP $\rightarrow$ RNR peut se faire à puissance $\approx$ constante

Nucléaire : réacteurs régénérateurs

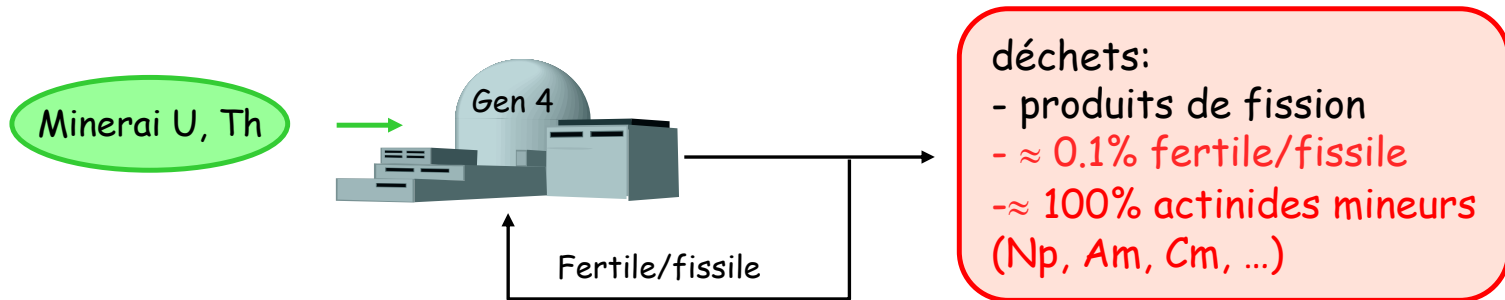
Inventaires de matière fissile appliquées au cas français

	RNR	RSF	RSF
	Na/Pb/He	thermique	rapide
Matière fissile	Pu (239→242)	U-233	U-233
Masse / GWe (t)	8-14	1-2	5-7
Masse France (t)	500-850	60-120	300-450

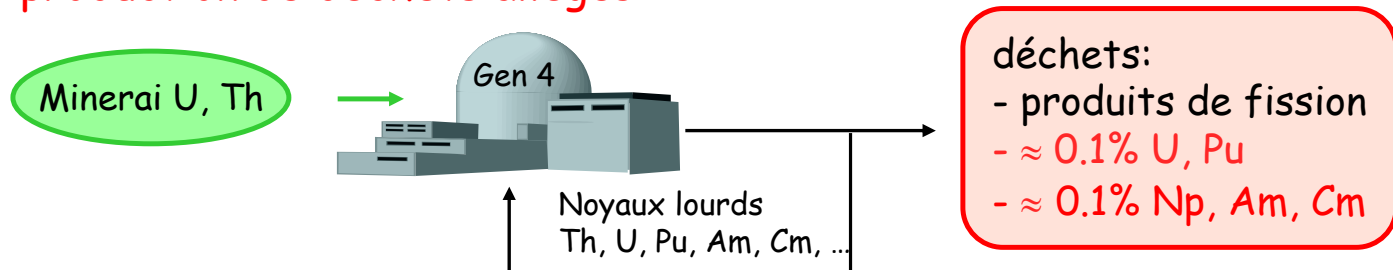
Inventaire plutonium en France en 2002 = 200 tonnes

Nucléaire : réacteurs régénérateurs

Pour la régénération, le recyclage est incontournable

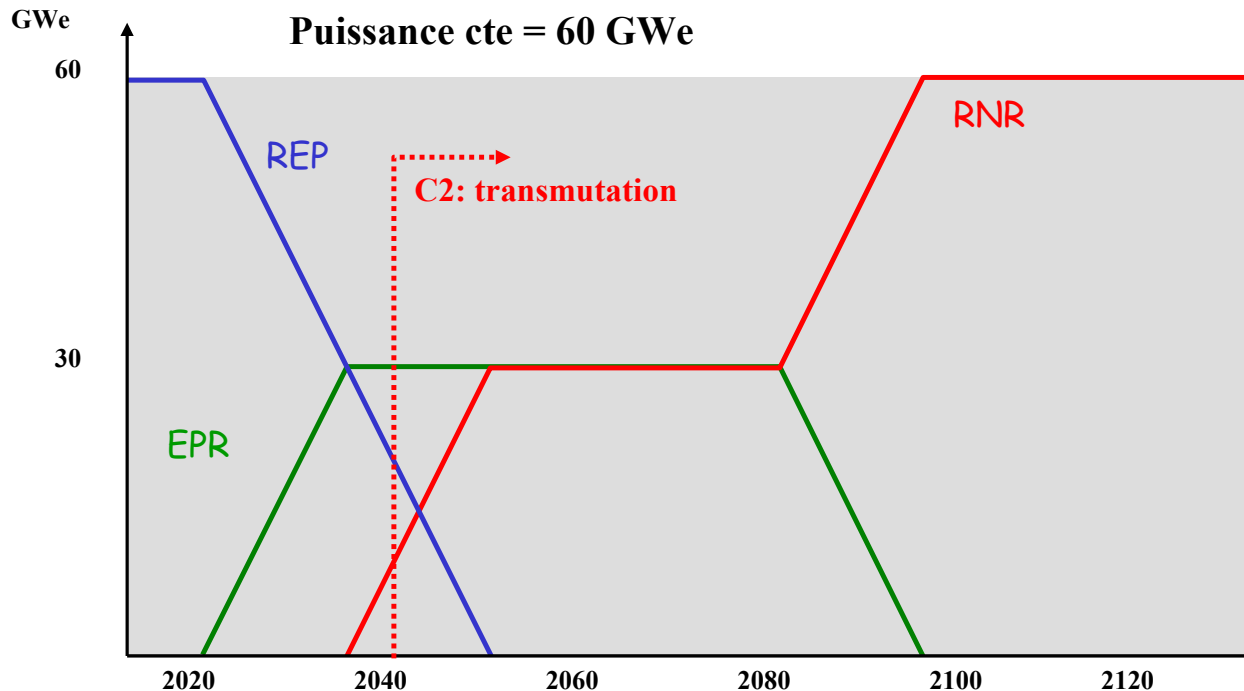


Possibilité de tout recycler: transmutation des actinides mineurs et production de déchets allégés



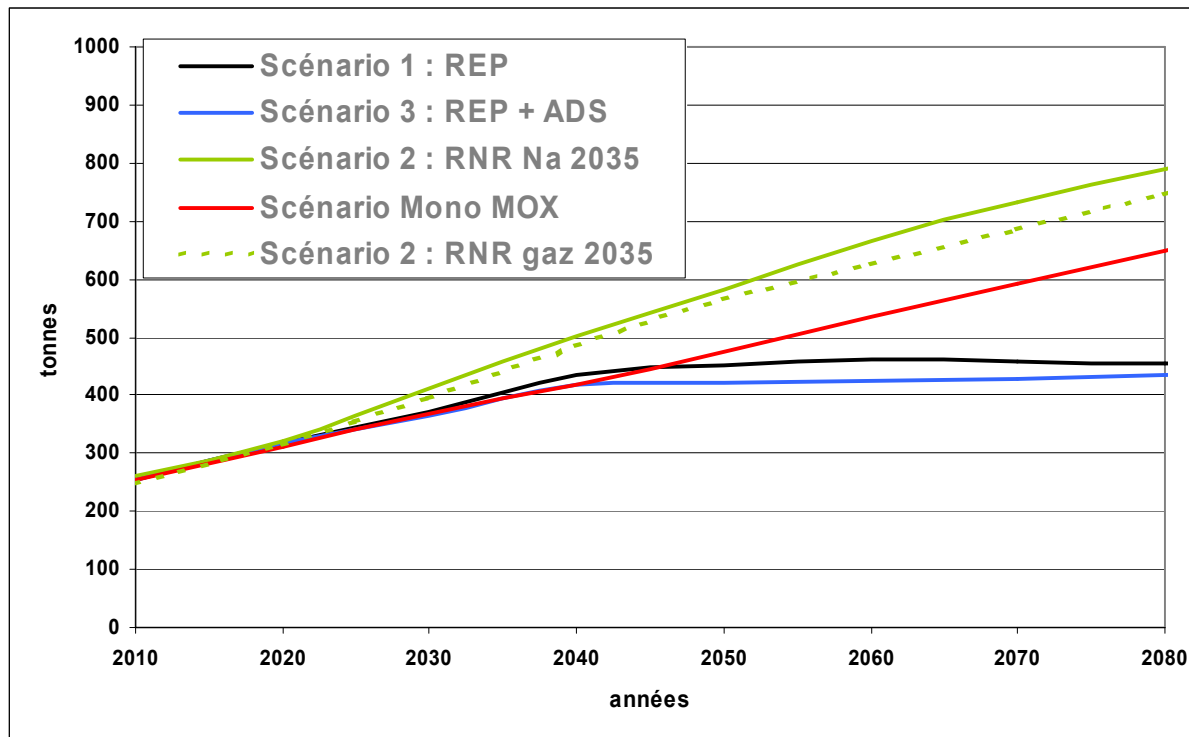
Nucléaire du futur : scénario français

Un scénario « de référence »



Nucléaire du futur : scénario français

Evolution du stock de plutonium selon divers scénarios français



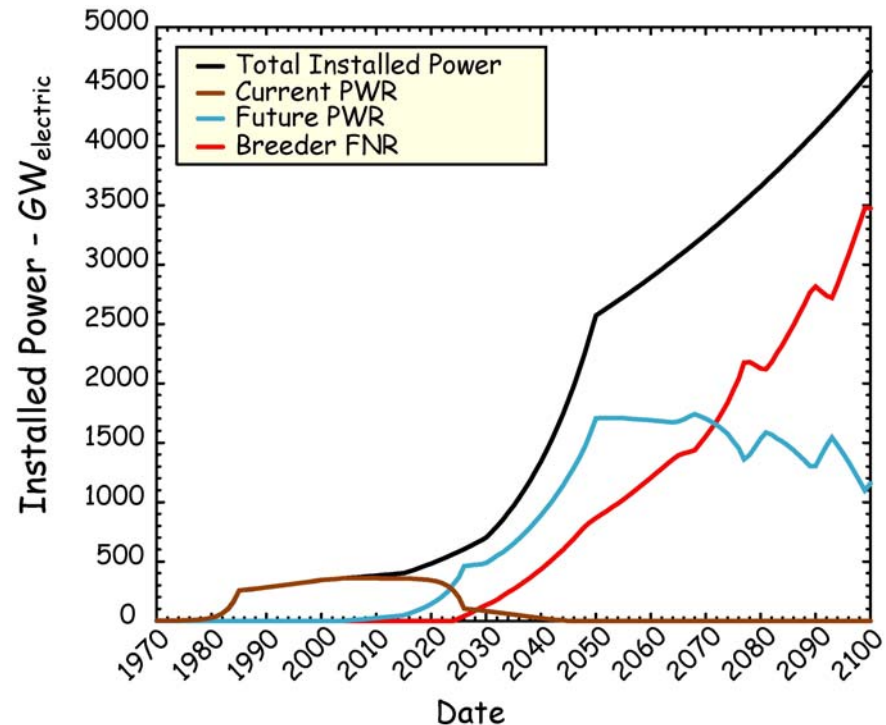
Réf: JP Grouiller, CEA

Nucléaire du futur : scénario mondial x10

Transition towards FBR U/Pu reactors

Scenario Characteristics:

- les REP dominant jusqu'en 2070
- U naturel consommé: 15 Mt
- Pu en Cycle: ~ 45000 t

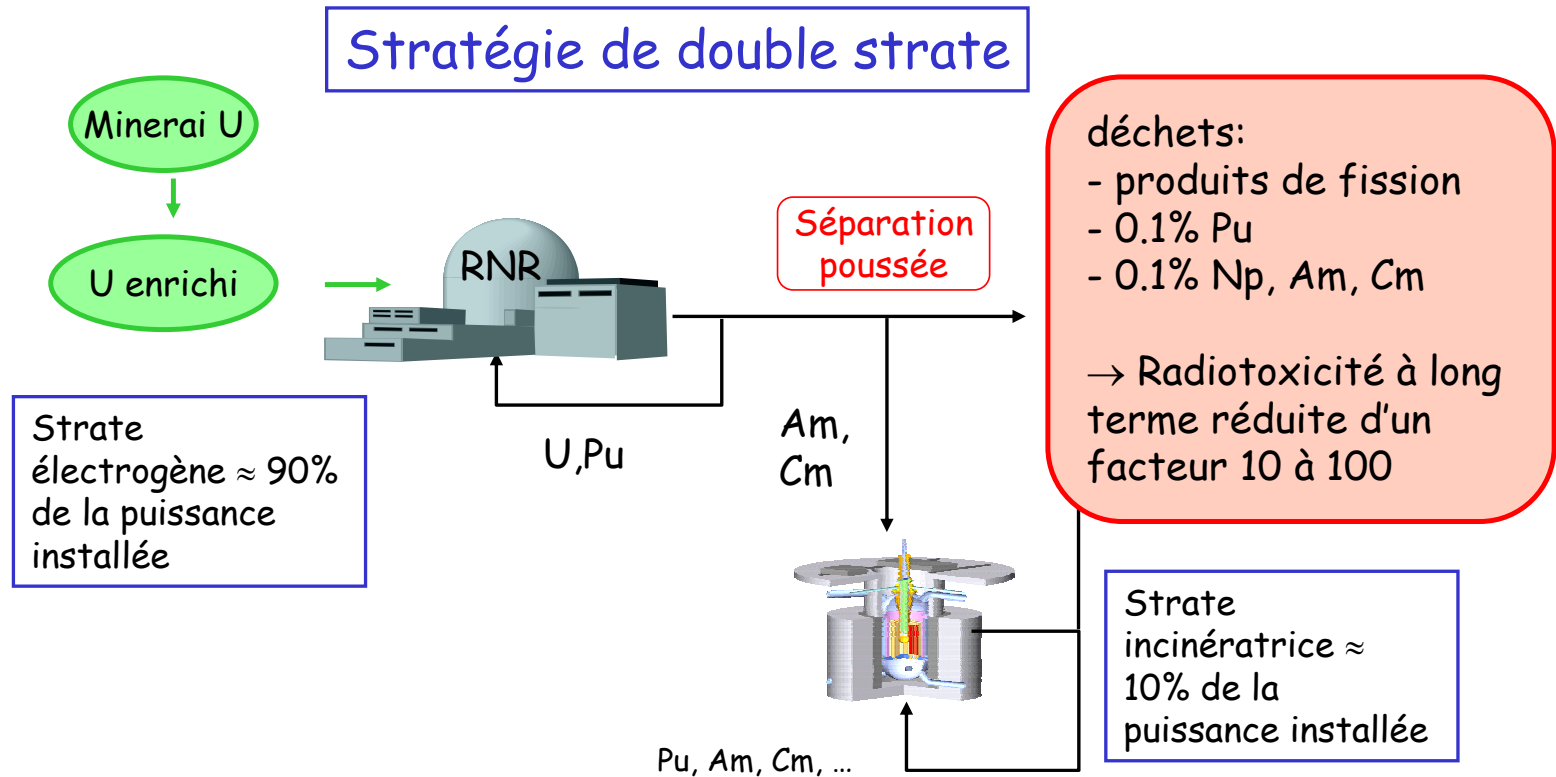


Réf: E. Merle, CNRS

Aval du cycle

Les réacteurs dédiés à l'incinération des actinides mineurs

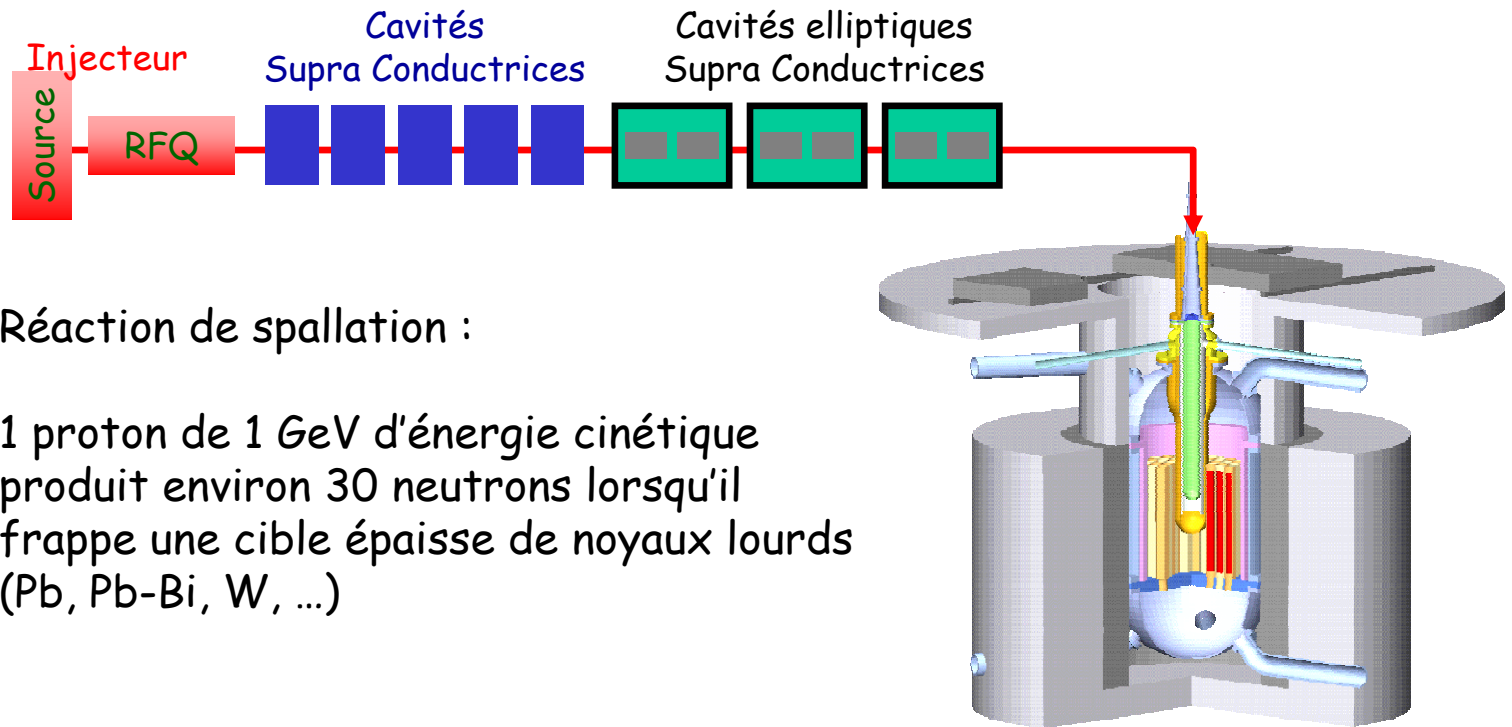
Nucléaire : réacteurs dédiés à l'incinération



Stratégie applicable à d'autres filières (REP notamment...)

Nucléaire : réacteurs dédiés à l'incinération

Concept de réacteur sous critique $k < 1$
alimenté en permanence par une source de neutrons



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, ...)

Nucléaire : réacteurs dédiés à l'incinération

Calcul du gain d'un réacteur hybride:

$$G = \eta_{\text{éch}} E_{\text{fis}} / (E_p / \eta_{\text{acc}}) = \eta_{\text{éch}} \eta_{\text{acc}} \frac{E_{\text{fis}}}{E_p}$$

Energie électrique
produite par les
fissions

Energie consommée
par l'accélérateur
pour produire un
proton de $E_p = 1 \text{ GeV}$

Les rendements des échangeurs thermiques et de l'accélérateur sont de l'ordre de 40%

Nucléaire : réacteurs dédiés à l'incinération

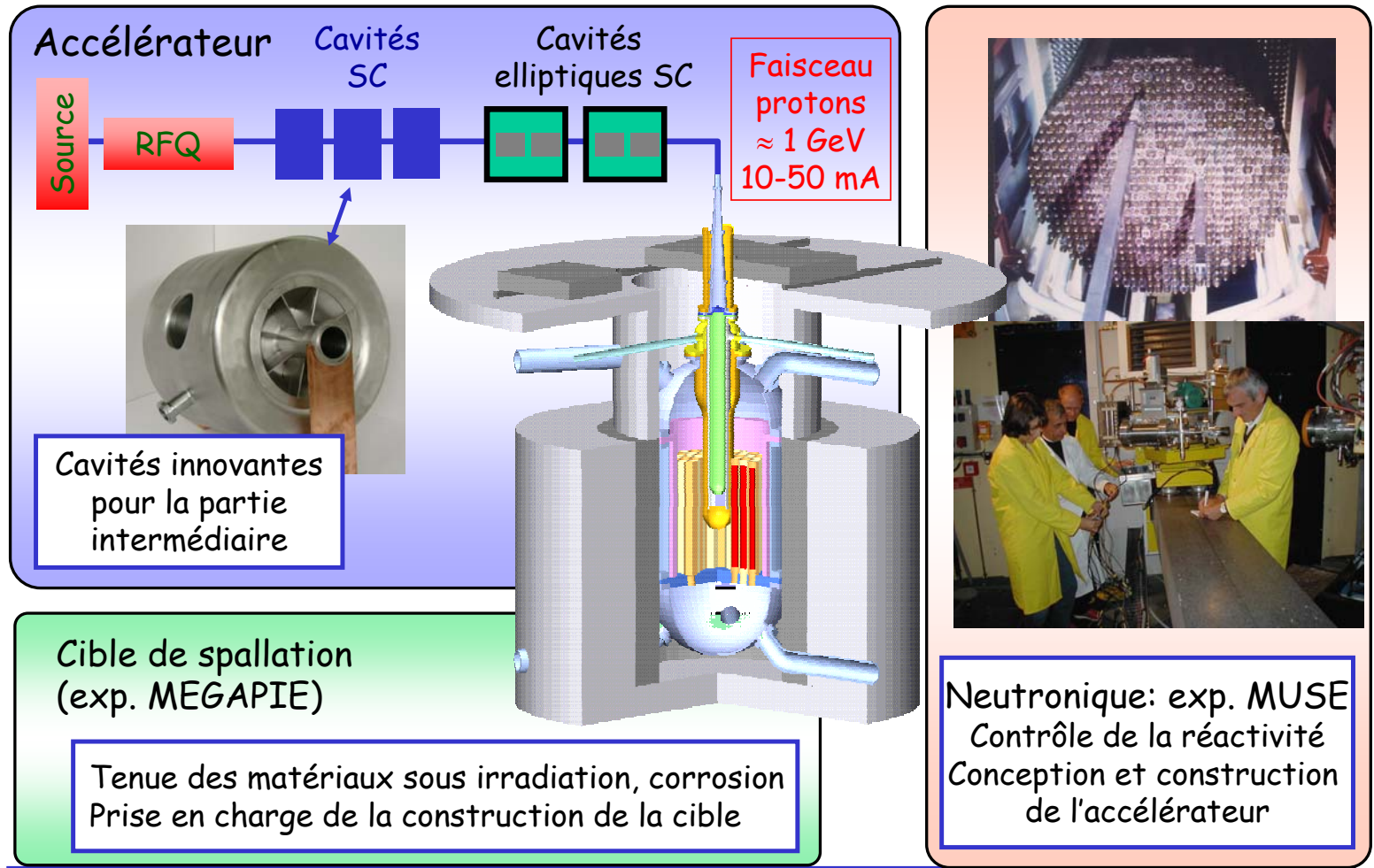
On raisonne pour un proton incident

Facteur de multiplication	k	0.95
Nbre de neutrons émis par 1 fission	ν	3
Nbre de neutrons source	N_s	30
Nbre de neutron / neutron source	$1 / (1-k)$	20
Probabilité pour un neutron d'induire une fission	k / ν	0.3
Nombre de fission / proton incident	$N_s \frac{k}{\nu} \frac{1}{1-k}$	≈ 150

$$G = \eta_{\text{éch}} \eta_{\text{acc}} \frac{N_s}{\nu} \frac{k}{1-k} \frac{\varepsilon_{\text{fis}}}{E_p} \approx 10$$

⇒ 10% de l'électricité produite permet de faire fonctionner l'accélérateur

Nucléaire : réacteurs dédiés à l'incinération



En conclusion

Si le nucléaire joue un rôle dans le futur, ce sera un rôle important !

Ne pas oublier les ordres de grandeur:

- Consommation d'énergie mondiale
- Réduction des gaz à effet de serre

Et puis: « pourquoi s'embêter avec une technologie complexe pour 3% de l'énergie? »

En conclusion

Nouvelles conditions à remplir:

- Récupérer toute l'énergie du minerais $\Rightarrow$ Régénération
- Optimiser la gestion des déchets $\Rightarrow$ Transmutation
- Assurer la sûreté passive des réacteurs du futur

Un champs de R&D très vaste :

Physique nucléaire, matériaux, chimie, économie, géologie,
sciences humaines, ...

Fin

Transparents annexes

Potentiel des réserves

Réserves minerais Uranium : 16.10^6 t (RRA+RSE+ressources spéculatives)
1 REP consomme 200 tonnes pour produire 1 GWe.an

→ Potentiel de 25 ans si la production actuelle est multipliée par 10

Recours à la surgénération (potentiel du minerai x200)

Cycle Uranium $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} (2j) \rightarrow ^{239}\text{Pu}$

Cycle Thorium $^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{Pa} (27\text{j}) \rightarrow ^{233}\text{U}$

Noyaux fertiles

Noyaux fissiles

Plus de problèmes de réserves

Questions

- Déchets (radiotoxicité induite, inventaires, chaleur résiduelle, ...)
- Vitesse de déploiement (capacité de surgénération)

Principe de surgénération

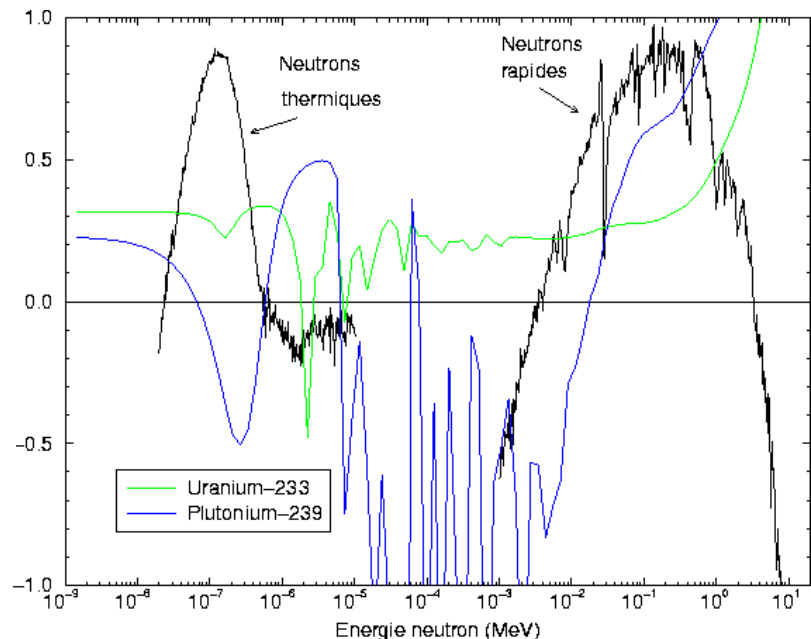
- La régénération consomme des neutrons :

Fission	1
Capture parasite sur fissile	$\sigma_{\text{cap}} / \sigma_{\text{fis}} = \alpha$
Régénération	$1 + \alpha$
Total consommé	$2(1 + \alpha)$
La fission produit	ν
N disponible	$\nu - 2(1 + \alpha)$

Pour que la surgénération soit possible, il faut $N_{\text{dispo}} > 0$

Cycle U/Pu $\Rightarrow$ spectre rapide

Cycle Th/U $\Rightarrow$ spectre rapide ou thermique



Surgénération : calcul de l'inventaire en fissile à l'équilibre

L'inventaire nécessaire en matière fissile I (normalisé par GWe) dépend de la puissance spécifique, du rendement, et de la concentration fissile/fertile

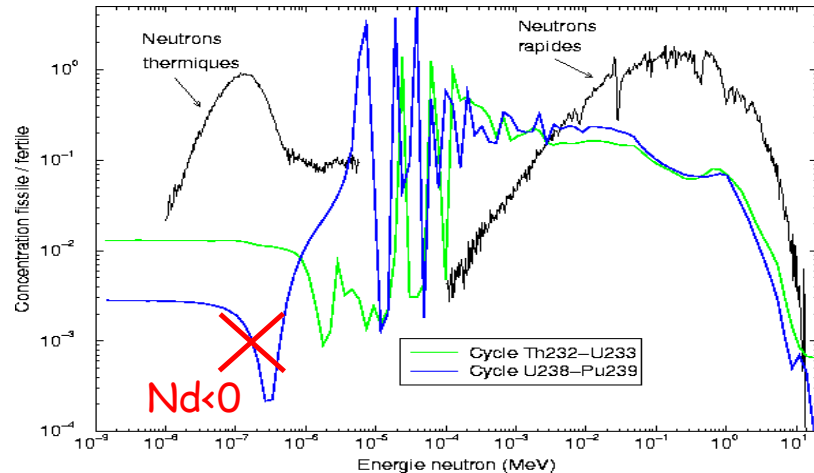
$$I_c / \text{GWe (kg)} = \frac{d_{\text{comb}}}{\rho_{\text{th}} \eta_{\text{th}}} \cdot \frac{N_{\text{fissile}}}{N_{\text{fissile}} + N_{\text{fertile}}} \Rightarrow = \frac{\sigma_{\text{fertile}}^{\text{cap}}}{\sigma_{\text{fertile}}^{\text{cap}} + \sigma_{\text{fissile}}^{\text{cap+fis}}}$$

ρ_{th}

$\approx 500 \text{ W/cm}^3$ pour Na, Pb
 $\approx 200 \text{ W/cm}^3$ pour He

η_{th}

$\approx 40\%$ pour métal liquide
 $\approx 50\%$ pour He haute Temp.



$\Rightarrow$ **Avantage du cycle thorium**
Concentration fissile/fertile 10 fois moins grande

Surgénération, cycle Uranium

Cycle uranium (^{238}U / ^{239}Pu)

Spectre de neutrons rapides

$E \approx 200 \text{ keV}$

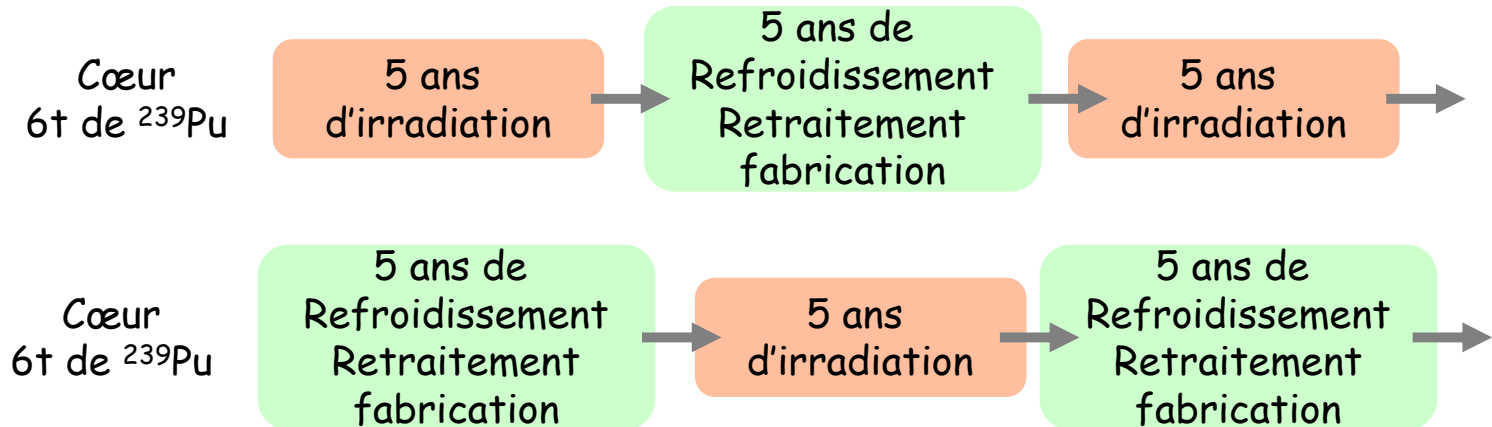
Matériaux légers (Hydrogène, Carbone) interdits

Caloporteur Sodium (métal liquide) → Superphénix

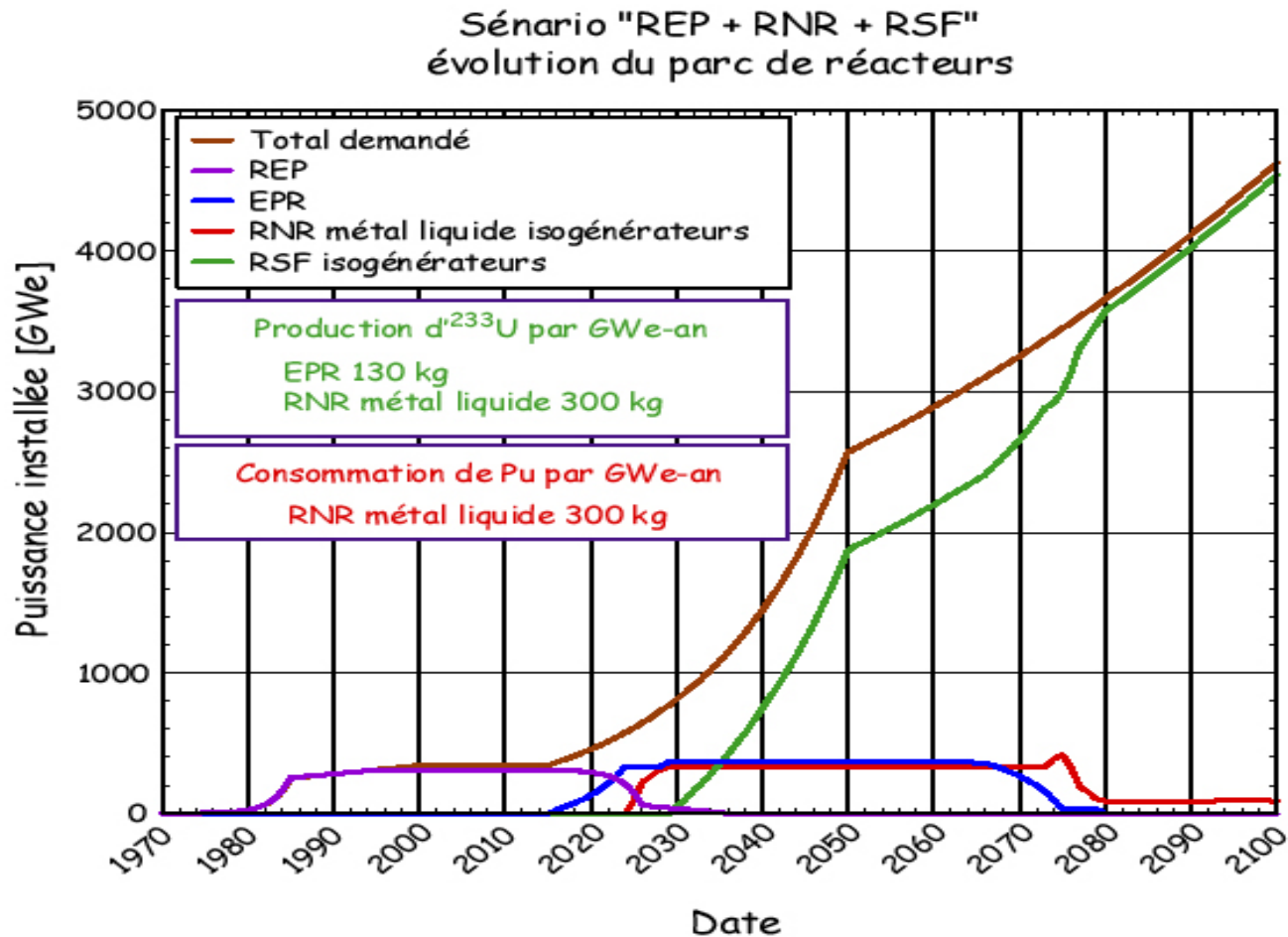
Réacteurs innovants à caloporteur Hélium

Retraitement du combustible tous les 5 ans

Inventaire matière fissiles 2x6 tonnes de ^{239}Pu



Scénario optimisé de déploiement



Contexte énergétique : présent et futur

Ex: scénario P.R. Bauquis (TotalFinaElf), nucléaire 20% en 2050 (x8)

