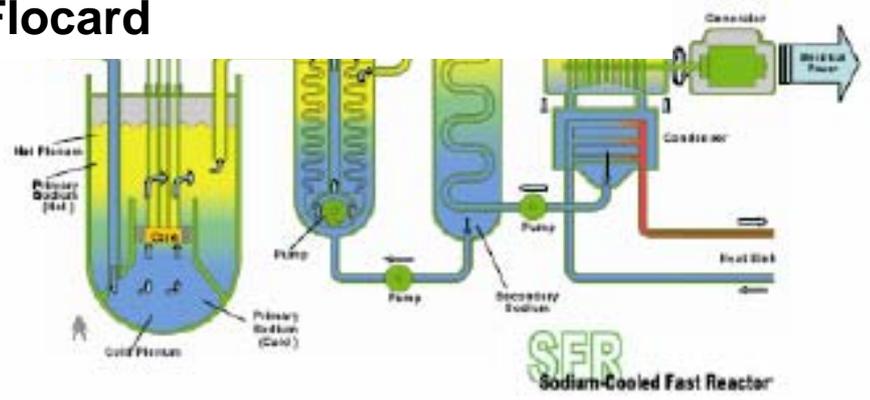


Nucléaire de Génération IV Pourquoi ? Comment ? Quand ?

Hubert Flocard



Remerciements : S. David, C. Garzenne, A. Mueller



Vocabulaire : de G-I à G-IV

Premières réalisations



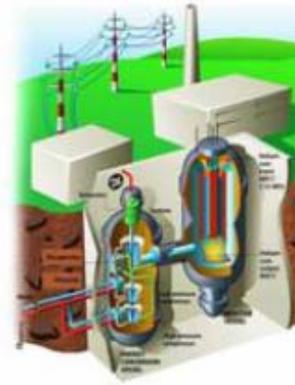
Réacteurs actuels



Réacteurs avancés



Systemes du futur

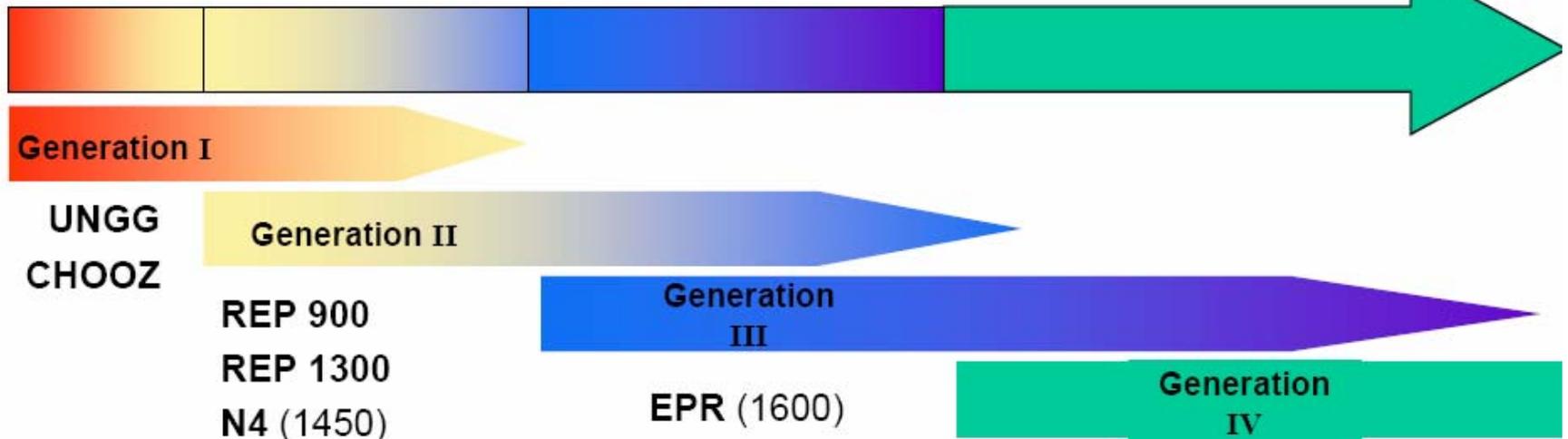


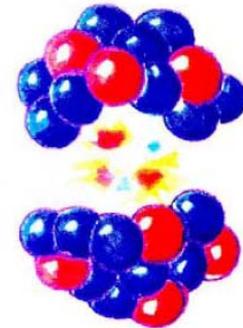
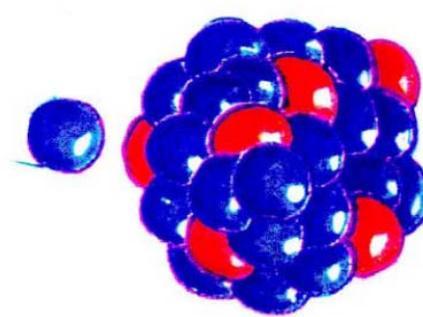
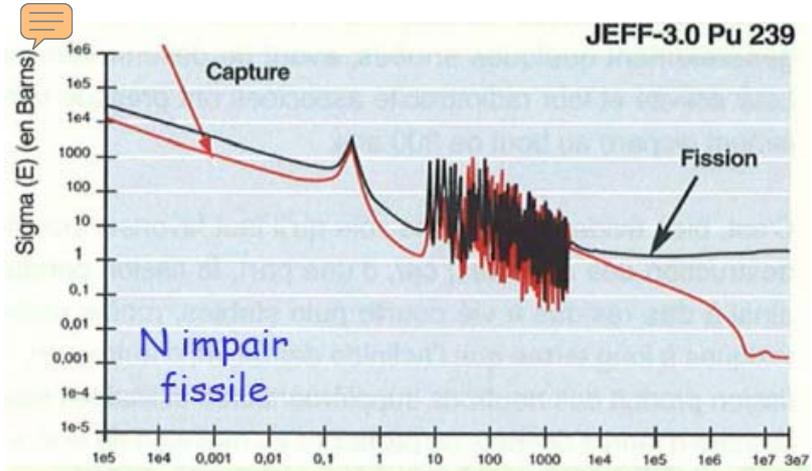
1950

1970

2010 ?

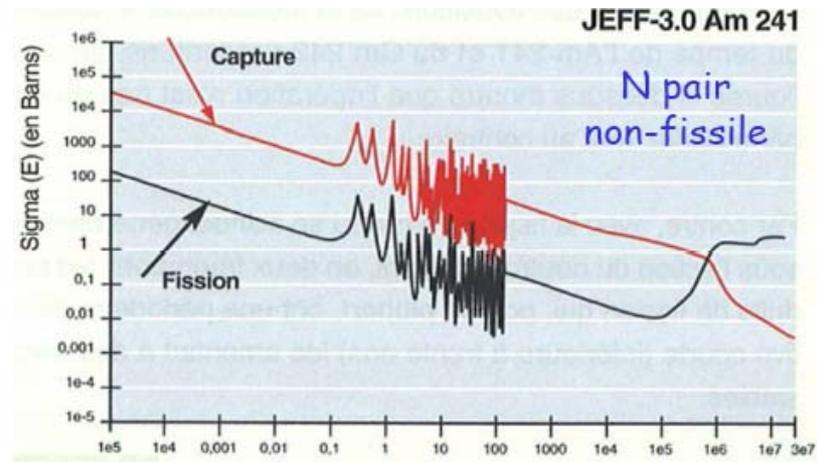
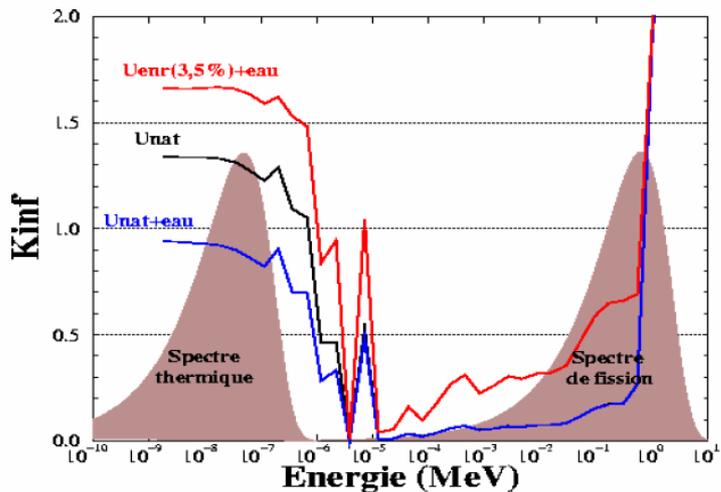
2045 ???





Généralités

Un peu de vocabulaire

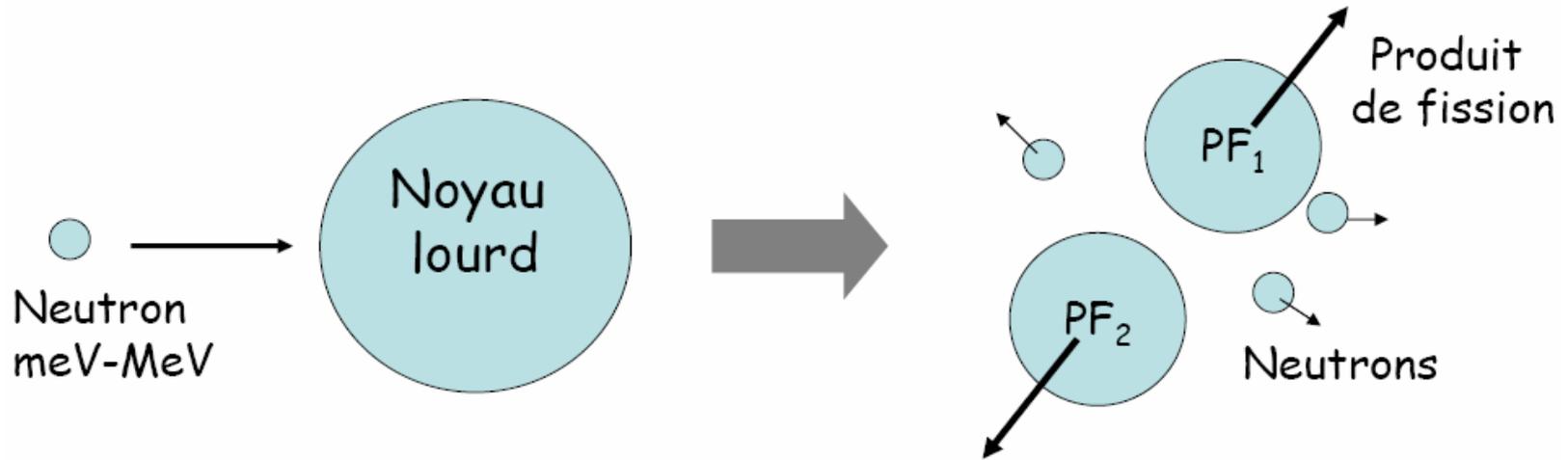




Fission & unité d'énergie microscopique

Etape 1 : Collision entre un neutron et un noyau lourd $A \rightarrow A+1^*$

Etape 2 : Cassure de $A+1^*$ en 2noyaux fragments; libération énergie plus neutrons



Unité énergie adaptée à une molécule, un atome ou un noyau : l'électron-volt, eV

Energie typique :

- Biologie – macro molécule (photosynthèse) : 1/100 eV à 1/10 eV
- Chimie – molécules & atomes (combustion) : 1 eV
- Physique nucléaire – neutrons & noyaux (réacteur) : 1/1000 eV à 1MeV

Une seule fission de noyau lourd libère 200MeV



Centrale & unité d'énergie macroscopique

- Une centrale (nucléaire ou autre) de puissance électrique 1GWe qui travaille à plein régime pendant 1 an livre au réseau (par définition) une énergie de 1GWe.an
- Mnémotechnique :
 - Pour produire 1GWe.an, toute centrale nucléaire (G-II, G-III, G-IV) doit faire fissionner ~ 1t de noyaux lourds (en fait plutôt 1.12t)
 - France nucléaire ~ 50 GWe.an
- Comparaison : Pour produire 1 GWe.an d'électricité
 - Centrale à Charbon brûle 3Mt de houille
 - Centrale à bois brûle 13Mstères de bois
- MAIS « Nature » plus « Limite technologique G-II » dégrade la performance nucléaire d'un facteur un peu inférieur à 200
- Pour produire 1GWe.an dans une centrale G-II il faut prélever entre 150 et 200t d'uranium naturel.



La Région des Actinides Eléments & Isotopes

Du Thorium au Plutonium en passant par l'Uranium Le domaine d'action du nucléaire civil

Z

94

93

92

91

90

										Plutonium														
										Pu 232	Pu 233	Pu 234	Pu 235	Pu 236	Pu 237	Pu 238	Pu 239	Pu 240	Pu 241	Pu 242	Pu			
										e capture 36m	e capture 20m	e capture 9.0h	e capture 24.3m	α 2.85y	e capture 45.6d	α 87.8y	α 2.439x10 ⁴ y	α 6540y	β ⁻ 15y	α 3.87x10 ⁵ y	β ⁻ 4.3			
										Np 229	Np 230	Np 231	Np 232	Np 233	Np 234	Np 235	Np 236	Np 237	Np 238	Np 239	Np 240	Np 241		
										α 4.0m	α 4.6m	α 50m	e capture 14.7m	e capture 35m	e capture 4.4d	e capture 396d	β ⁻ 22.5h	α 2.14x10 ⁶ y	β ⁻ 2.12d	β ⁻ 2.35d	β ⁻ 7.5m	β ⁻ 16.0m		
Uranium										U 226	U 227	U 228	U 229	U 230	U 231	U 232	U 233	U 234	U 235	U 236	U 237	U 238	U 239	U 240
										α ~0.5s	α 1.1m	α 9.1m	e capture 58m	α 20.8d	e capture 4.2d	α 72y	α 1.58x10 ⁵ y	α 2.44x10 ⁵ y	α 7.04x10 ⁸ y	α 2.34x10 ⁷ y	β ⁻ 6.75d	α 4.47x10 ⁹ y	β ⁻ 23.5m	β ⁻ 14.1h
Pa 222	Pa 223	Pa 224	Pa 225	Pa 226	Pa 227	Pa 228	Pa 229	Pa 230	Pa 231	Pa 232	Pa 233	Pa 234	Pa 235	Pa 236	Pa 237	Pa 238								
α 5.7ms	α ~6.5ms	α ~0.95s	α 1.8s	α 1.8m	α 38.3m	e capture 26h	e capture 1.4d	e capture 17.4d	α 3.25x10 ⁴ y	β ⁻ 1.32d	β ⁻ 27.0d	β ⁻ 6.67h	β ⁻ 24.1m	β ⁻ 9.1m	β ⁻ 8.7m	β ⁻ 2.3m								
Th 221	Th 222	Th 223	Th 224	Th 225	Th 226	Th 227	Th 228	Th 229	Th 230	Th 231	Th 232	Th 233	Th 234	Th 235										
α 1.7ms	α 2.9ms	α 0.66s	α 1.04s	α 8m	α 31m	α 18.72d	α 1.913y	α 7340y	α 7.7x10 ⁴ y	β ⁻ 25.52h	α 100% 1.40x10 ¹⁰ y	β ⁻ 22.2m	β ⁻ 24.1d	β ⁻ 6.9m										
															Thorium									

Pour distinguer les lignes entre elles, les « éléments », on PEUT utiliser des méthodes de la chimie (plus « aisé »)

Pour distinguer les cases sur une ligne, les « isotopes », il FAUT utiliser des méthodes physique (plus « difficile »)



« Thermique » ou « Rapide »

- « neutron thermique » = neutron dont l'énergie est celle d'une molécule dans un liquide à température ordinaire (20°C).
Il s'agit d'énergies de l'ordre de 25 meV.
- Par extension « réacteur thermique » = réacteur dans lequel les neutrons sont essentiellement des neutrons thermiques.
- Les réacteurs G-II et G-III sont des réacteurs de ce type. En France ils sont tous du type REP (réacteurs à eau pressurisée).

- « neutron rapide » = neutron dont l'énergie est comprise entre 100keV et 1MeV soit 4000 fois à 40000fois plus grande.
- « Réacteur rapide » = réacteur dont l'énergie moyenne des neutrons est dans le domaine « rapide ». On dira aussi des RNR
- Presque tous les réacteurs considérés dans le cadre de G-IV sont des RNR.



« Thermique » et « N-impair » vont bien ensemble

Propriétés de physique nucléaire fondamentale :

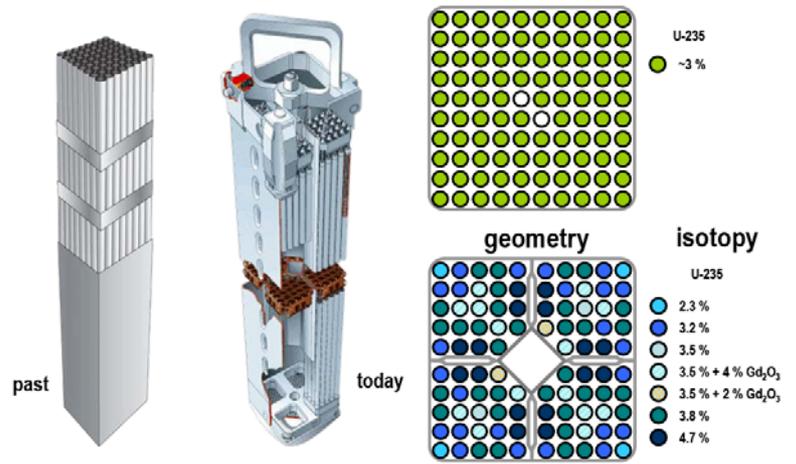
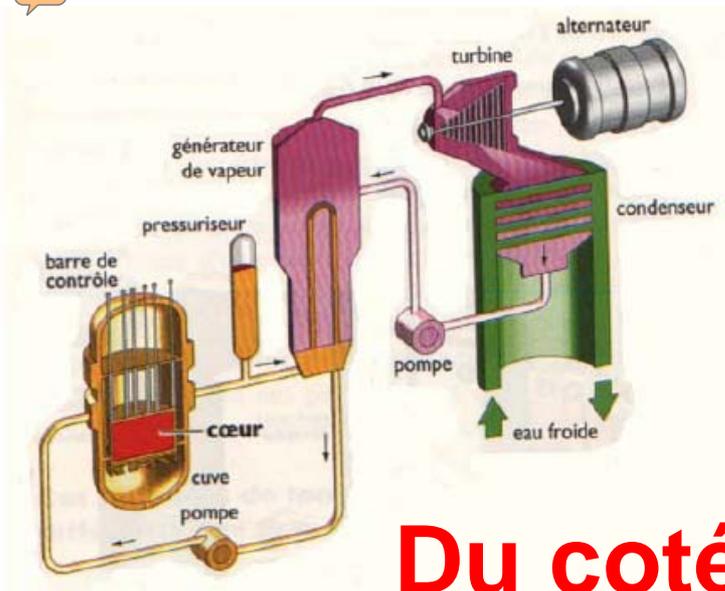
- Un noyau impair en neutrons comme U5 ou Pu9 (ou tout autre) fissionne très bien quand il absorbe un neutron d'énergie thermique (donc dans un REP)
- Un noyau pair en neutron comme U8 (ou tout autre) ne fissionne PAS en absorbant un neutron d'énergie thermique il l'avale (on dit le « capture ») le « digère » puis évolue selon les lois de la radioactivité naturelle.

Dans un REP les isotopes pairs (les plus nombreux) sont dans un premier temps des observateurs parasites.

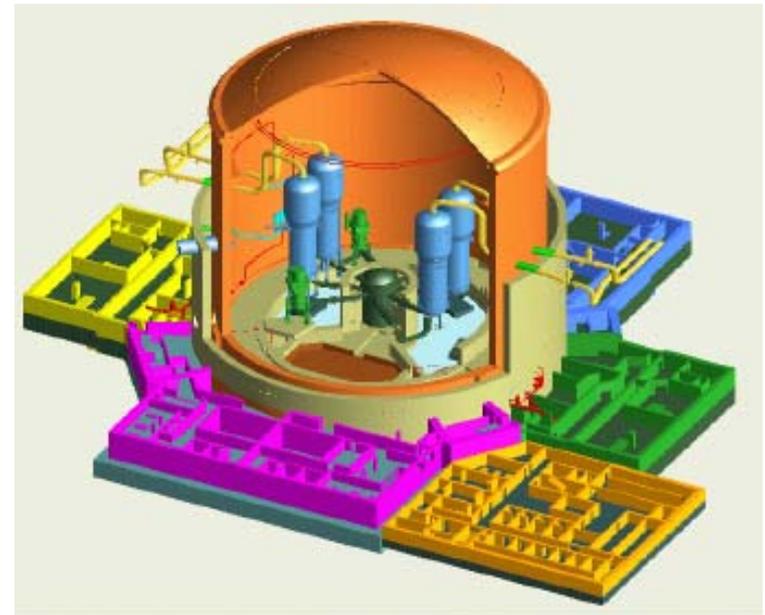
- Noyaux pairs et impairs fissionnent un peu plus difficilement, mais de façon semblable quand ils absorbent un neutron rapide.

Tous les noyaux jouent un rôle similaire. C'est la « démocratie isotopique » recherchée par les RNRs.

Une ambition des RNR : supprimer la distinction « fissile » « fertile »



Du coté de G-II et G-III





Bilan massique . Entrée-Sortie

**Bilan pour un réacteur REP-UOx 2009 1GWe.an
45GW.j/t, U5/U 3.7%, 4 ans en réacteur, conversion Q-E 34%**

Isotope	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Bilan (kg)
U4	8	4	-4
U5	883	169	-714
U6	0	114	114
U8	22979	22169	-809
U	23870	22457	-1413
Np7	0	14	14
Pu8	0	6	6
Pu9	0	142	142
Pu0	0	66	66
Pu1	0	41	41
Pu2	0	19	19
Pu	0	274	274
Am	0	6	6
Cm	0	3	3

La colonne de bilan montre bien qu'on a perdu ~1,115 t de noyaux lourds

**Limite de la technologie G-II :
Il faut injecter chaque année
~ 24t d'uranium
enrichi à 3,7% de U5 pour
faire fissionner seulement
1,1t de noyaux lourds**

**On a déjà négligé
~ 23/24
de la ressource Uranium
injectée dans le réacteur**

Efficacité globale GII-GIII

- Mais la Nature diminue encore l'efficacité
 - concentration U5 dans Unat ~ 0,7% seulement
 - concentration U5 dans combustible UOx ~3,7 %
- Enrichissement
Unat (0,7% U5) -> UOx (~ 3,7% U5) + Uappauvri (~ 0,25% U5)

Si on extrayait tout l'U5 de l'Unat ($3,7/0,7 = 5,3$)

$24 \times 5,3 = 127$ t Unat -> 24 t UOx (3,7%)

Comme l'enrichissement laisse de l'U5 dans Uapp (~ 0,25%)

$24 \times 7,5 = 180$ t Unat -> 24 t UOx

-Efficacité globale REP (EDF) pour 1 GWe.an	2009	1994
- taux de combustion (GW.j/t)	45	33
- masse noyaux lourds fissionnés	1,1t	1,1t
- masse UOx (3,5 - 4%)	24t	32 t
- masse Unat (0,7%)	180t	210t

Efficacité globale G-II et/ou G-III ~ 0,5 - 0,6%

Mais, il y a des restes !

Bilan pour un réacteur REP UOx 2009 produisant 1GWe.an

Isotope	Entrée (kg)	Sortie (kg)	Bilan (kg)
U4	8	4	-4
U5	883	169	-714
U6	0	114	114
U8	22979	22169	-809
U	23870	22457	-1413
Np7	0	14	14
Pu8	0	6	6
Pu9	0	142	142
Pu0	0	66	66
Pu1	0	41	41
Pu2	0	19	19
Pu	0	274	274
Am	0	6	6
Cm	0	3	3

Uranium :

**En sortie il reste de l'U5
concentration ~ 0,75%
(mieux que l'Unat !)**

**Uranium de retraitement (URT)
enrichissement ->
Uranium re-enrichi (URE)**

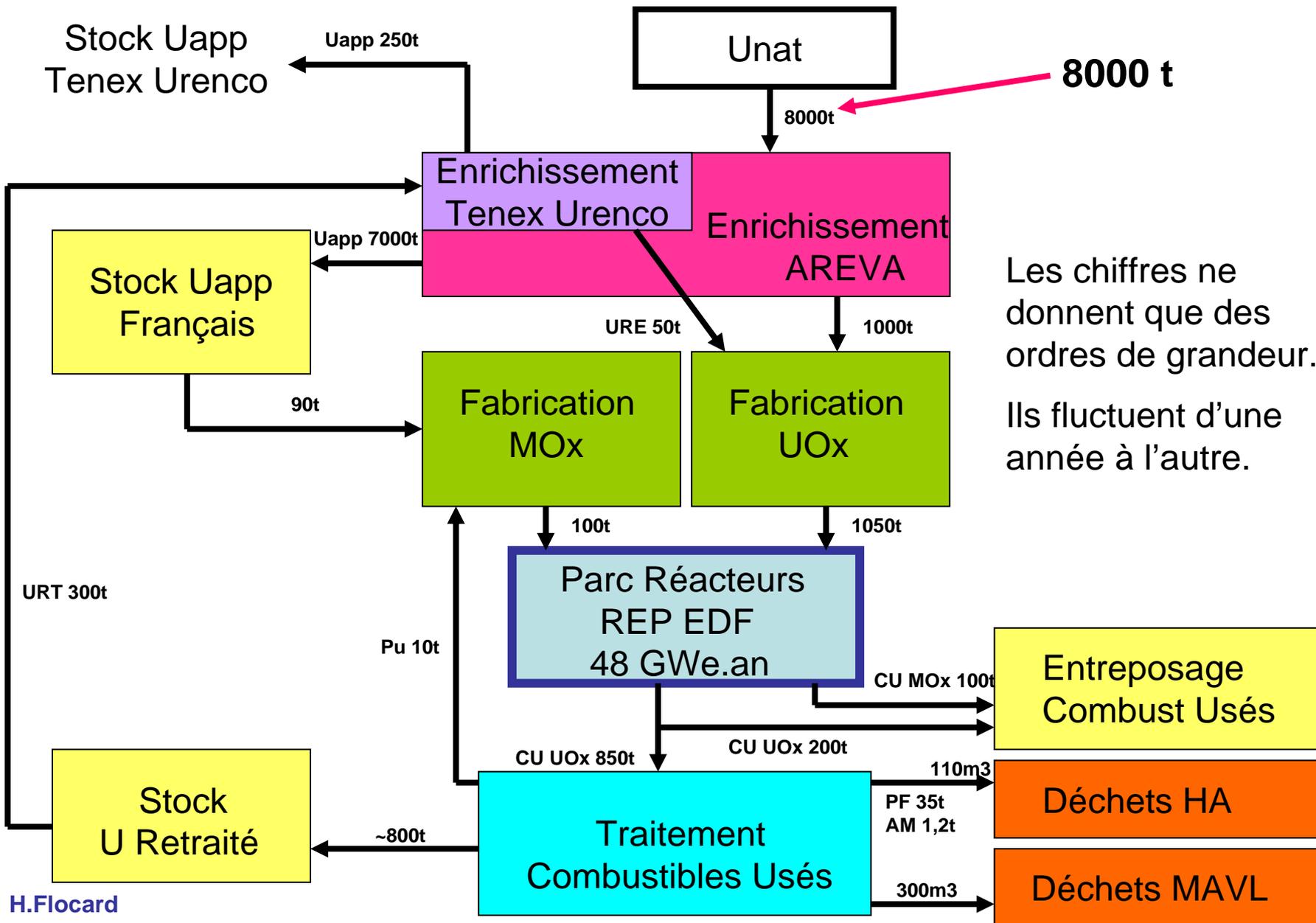
Plutonium :

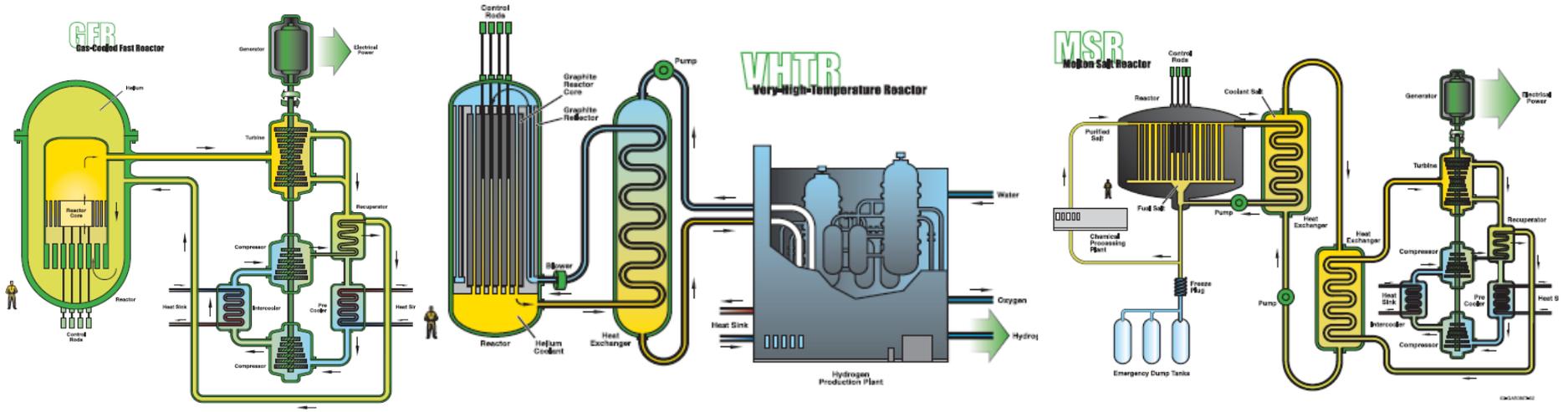
**On a fabriqué isotopes impairs
du plutonium Pu9 et Pu1**

**Séparation (chimique) ->
MOx**

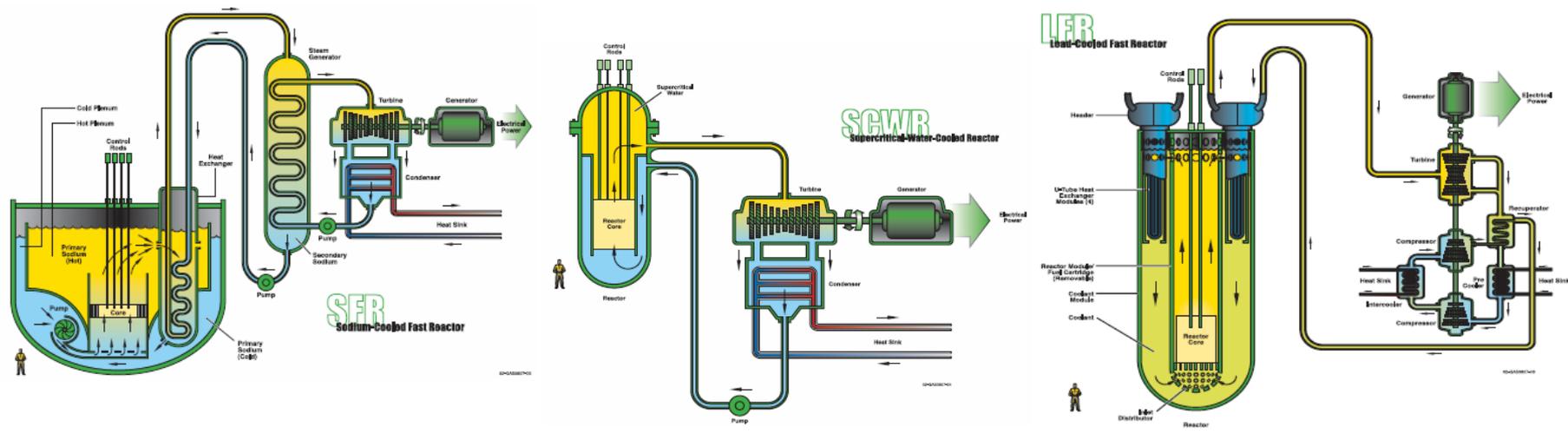
$$\text{Coefficient de Conversion} = \frac{\text{Noyaux impairs Sortie}}{\text{Noyaux impairs Entrée}} \sim 0.35$$

Flux massiques annuels dans le cycle français G-II





A la recherche de G-IV



Initiatives Internationales

Critères d'action du Gen-IV International Forum (GIF)

1) Durabilité

1.a Meilleur usage de la ressource U

1.b Miminution des nuisances associées aux déchets

2) Compétitivité économique

3) Sûreté de fonctionnement et disponibilité accrue des réacteurs

4) Résistance à la prolifération et aux agressions physiques.



Le GIF a sélectionné six grandes classes de réacteurs

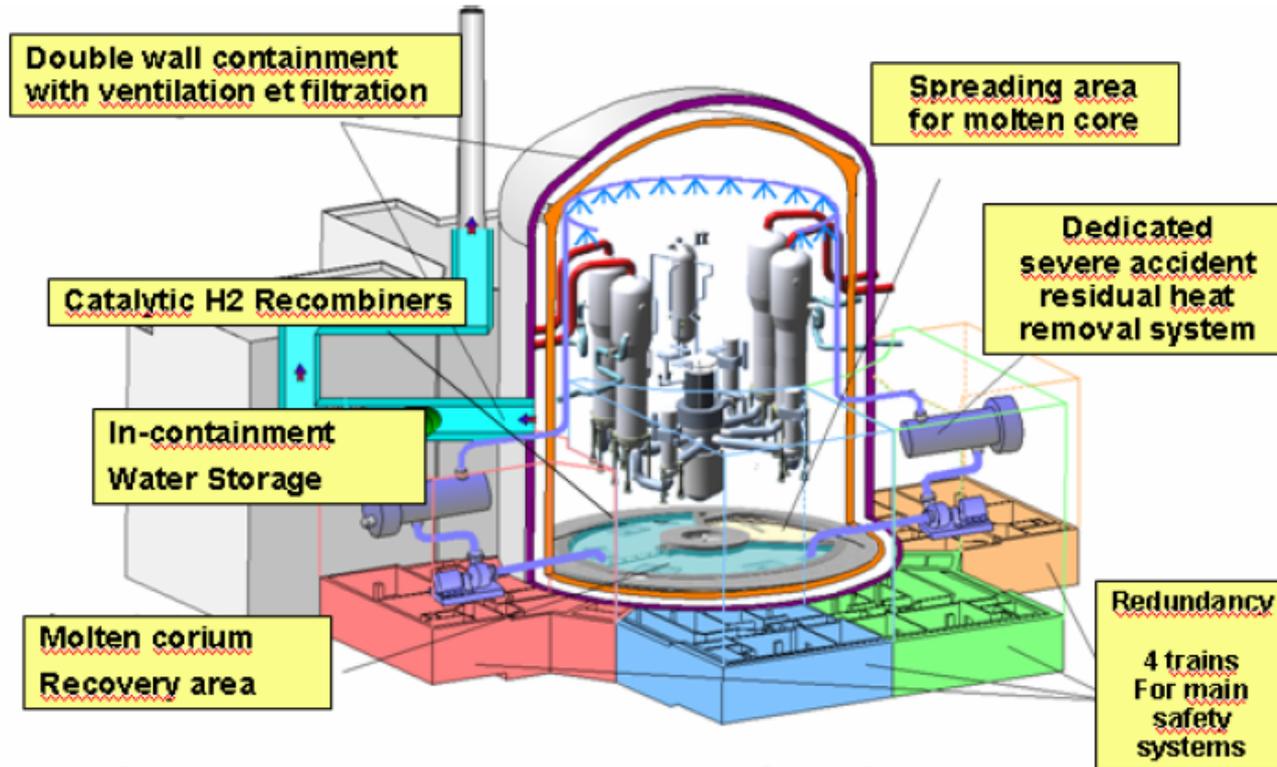
En relation avec G-IV, au plan européen, création de la
Sustainable Nuclear Energy
Technological Platform
SNETP



Strategic Research
Agenda

C3; Sûreté, l'«ombre» de G-III

Pour les autorités de sûreté du monde occidental le statut de G-III va fixer le «niveau minimum» des exigences en matière de sûreté.



Au sens des études probabilistes de sûreté, l'EPR a atteint un niveau de sûreté dix fois meilleur que celui des centrales G-II.

C'est la nouvelle référence.

Les exigences pour G-IV ne sont plus celles des années 1980-90 !



Sûreté, l'opinion de GIF

**Interview J. Bouchard, président du GIF, Nucleonics Week 09/09/2009
(traduction et réorganisation du texte par H. Flocard)**

Le travail sur les systèmes de réacteurs G-IV a révélé que les défis les plus importants sont les questions de sûreté

- pour les RNR-Na le problème reste d'assurer la sûreté du cœur en particulier d'éviter une montée de réactivité incontrôlable en cas de perte de réfrigérant. (-> mention lignes de remèdes poursuivies)**
- pour les RNR-Gas le défi est celui d'un design du support du combustible (-> mention travail sur les céramiques)**
- pour les RNR- Eau-Supercritique, le problème potentiel est celui d'une transition brusque d'une quasi-eau à une quasi-vapeur.**

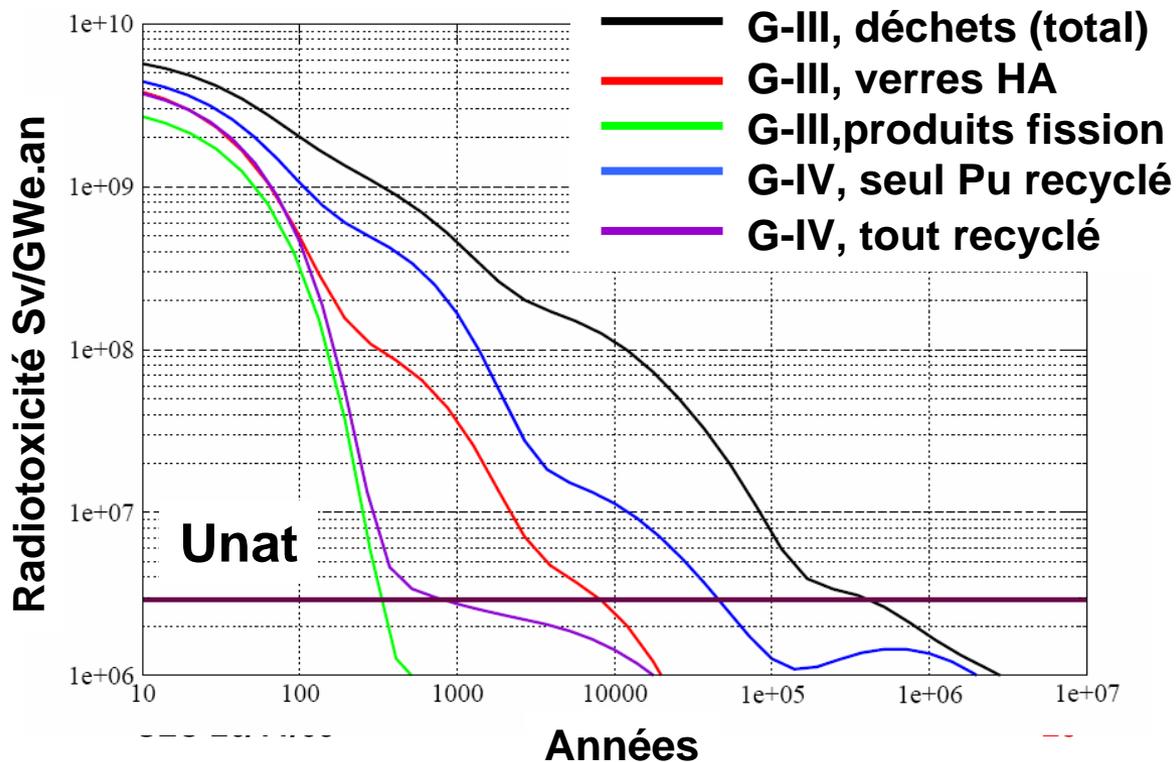
J. Bouchard ne dit rien sur le dossier de sûreté des RNR-Plomb ni sur celui des RNR-Sels-Fondus dont il considère certainement l'état d'avancement moindre que celui des autres systèmes.

faire « moins » de déchets

Quel est donc le problème ?



Quelles améliorations pour la radiotoxicité des flux de déchets la physique de la transmutation en réacteur rapide permet elle d'espérer ?



Flux de déchets les cycles «fermés»

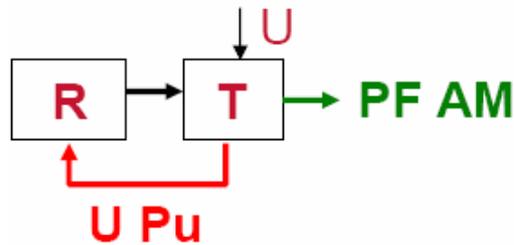
Rappel de vocabulaire

Cycle « ouvert » : tous les combustibles usés sont considérés comme des déchets ultimes.

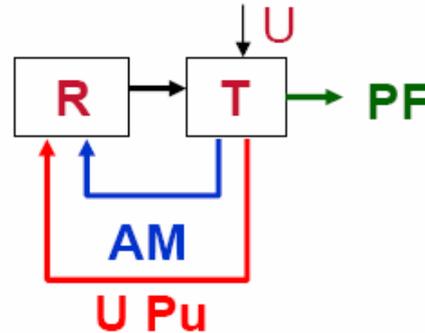
Longtemps la position officielle US; jusqu'à la naissance de GIF. C'est la position actuelle de Suède, Finlande, Suisse, ...

G-IV repose sur la notion de cycles « fermés ».

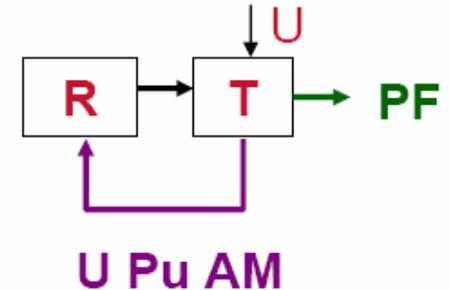
: recyclage du Pu et/ou des éléments lourds tel que Np, Am, Cm, qui se trouvent dans le combustible déchargé des réacteurs



1. Recyclage
U Pu seuls:



2. Recyclage
hétérogène



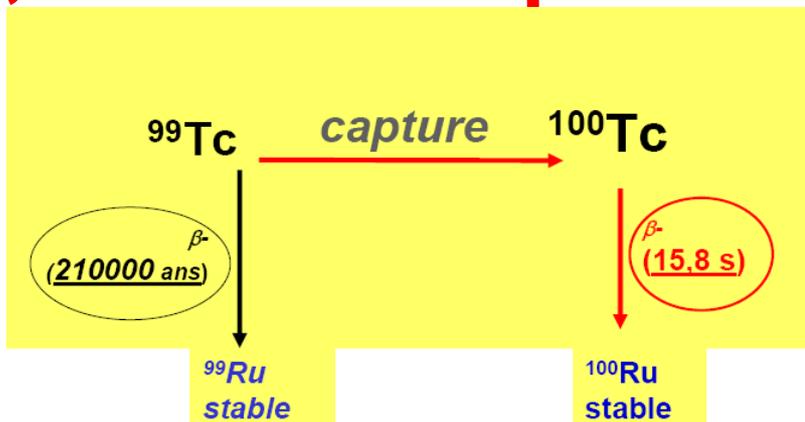
3. Recyclage
homogène

R = réacteurs RNR-G-IV

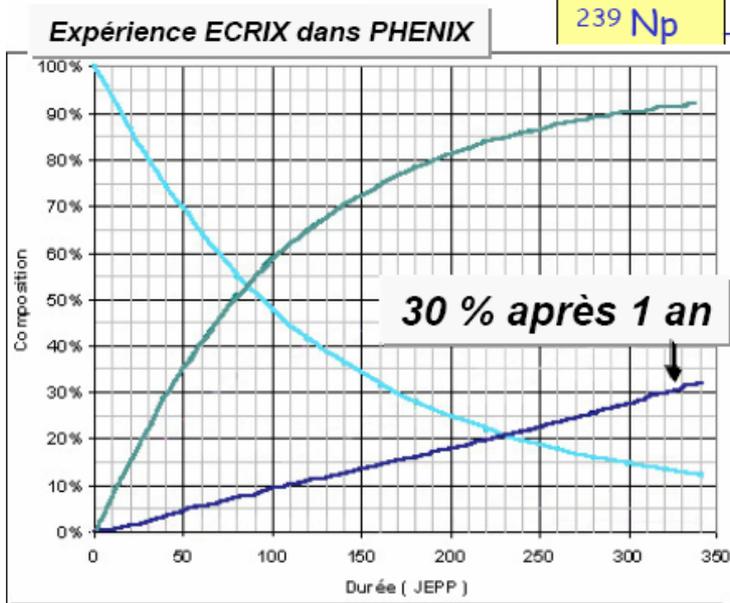
T= usine Combustible + Retraitement

Flux de déchets, transmuter pour détruire

Le rêve du transmuteur

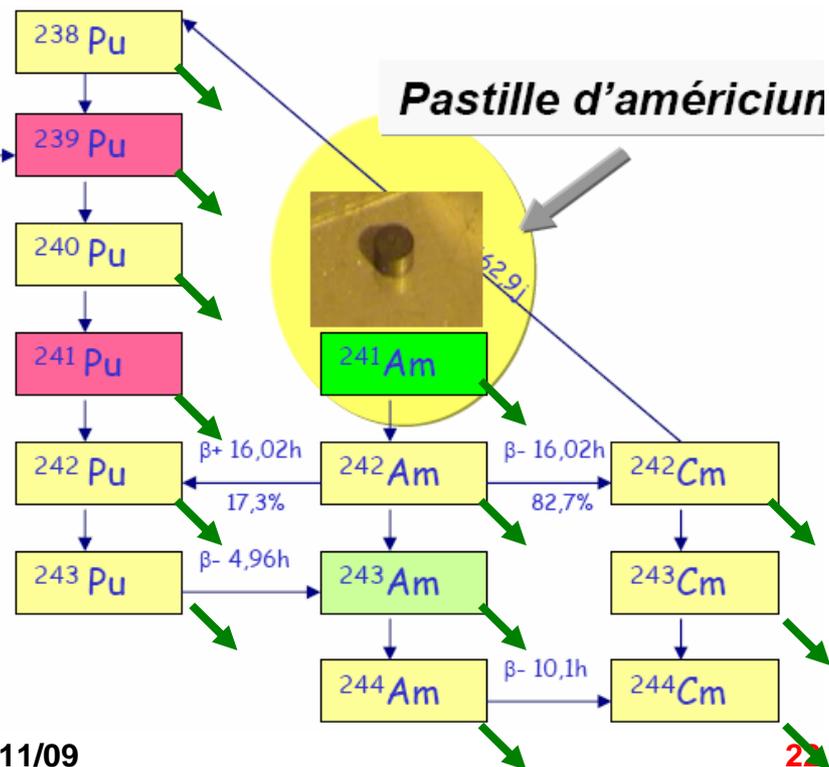


La réalité du transmuteur



H.Flocard

SLC-26/11/09



Déchets; ne pas oublier l'inventaire

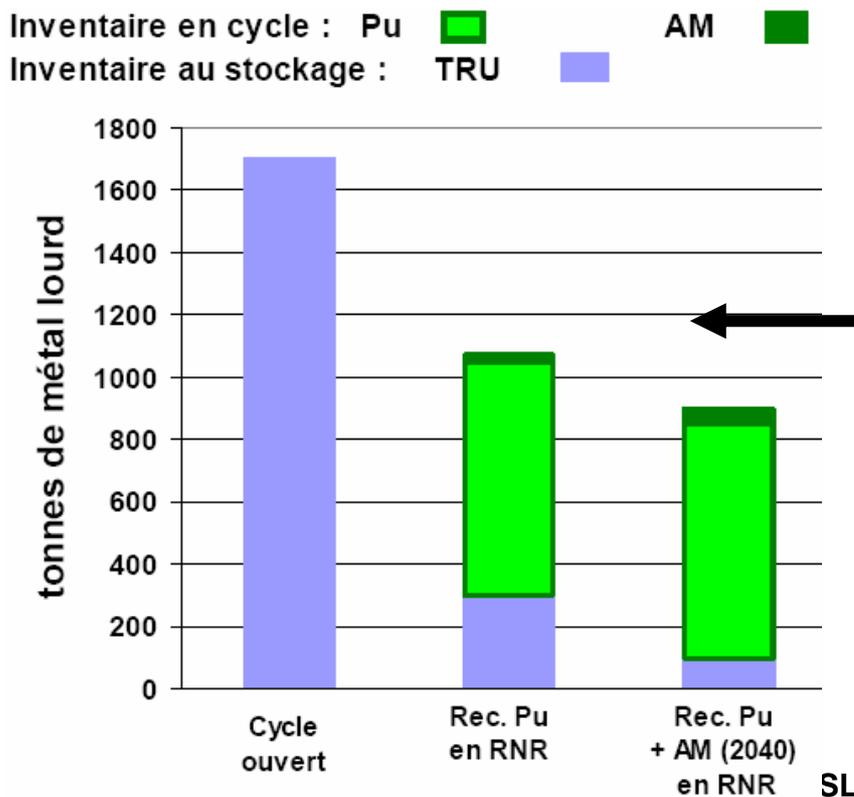
Recycler = sans cesse réinjecter dans les réacteurs ce qui en sort.

Flux de déchets = Produits de Fission + pertes au retraitement

A long terme, une stratégie forcément gagnante.

Réponse : Mais qu'est ce que le « long terme » ?

- Le moment où l'inventaire des réacteurs du parc est à l'équilibre.
- Nature (σ_{eff} +résistance matériaux) -> ~100 ans après lancement G-IV



Lorsqu'on arrête d'utiliser fission nucléaire, les inventaires deviennent des déchets !

Situation en 2140, si on a démarré la transmutation en RNR en 2040

Le gain de radiotoxicité ne devient important qu'au bout de quelques centaines d'années de fonctionnement de parc RNR -> de la patience !

NB: le gain en volume est de l'ordre de 25 !

Calcul de ressource U à la mode ENR

Géologie -> concentration moyenne U dans la croûte terrestre

Cu=3g par tonne

France : 550 000km2**

France sur 5m de profondeur (d=2) -> 5,5x 1012 t (terre)**

France -> 16,5 Mt Unat

Nombre d'années d'exploitation du parc GII actuel (8000t Unat/an)

> 2000 ans

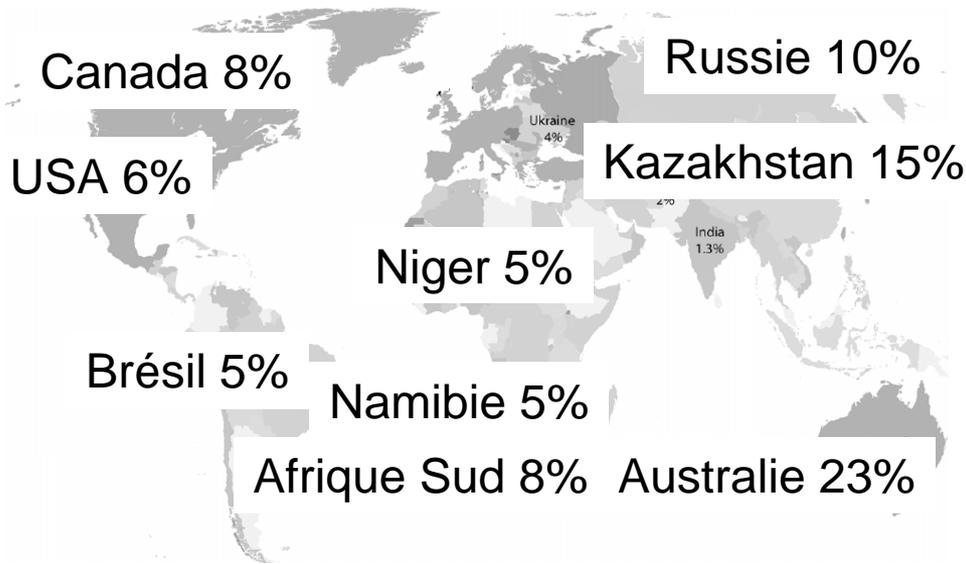
On n'aurait donc pas besoin de G-IV !!

Mais,

- **La dilution spatiale a un coût important. Ce qui vaut pour les ENR vaut aussi bien sûr pour l'uranium.**
- **Gisement considéré comme économiquement exploitable :Cu> 3kg/t.**
- **Gisements exploités aujourd'hui Cu>30kg/t.**



Ressource U exploitable pour usage G-III



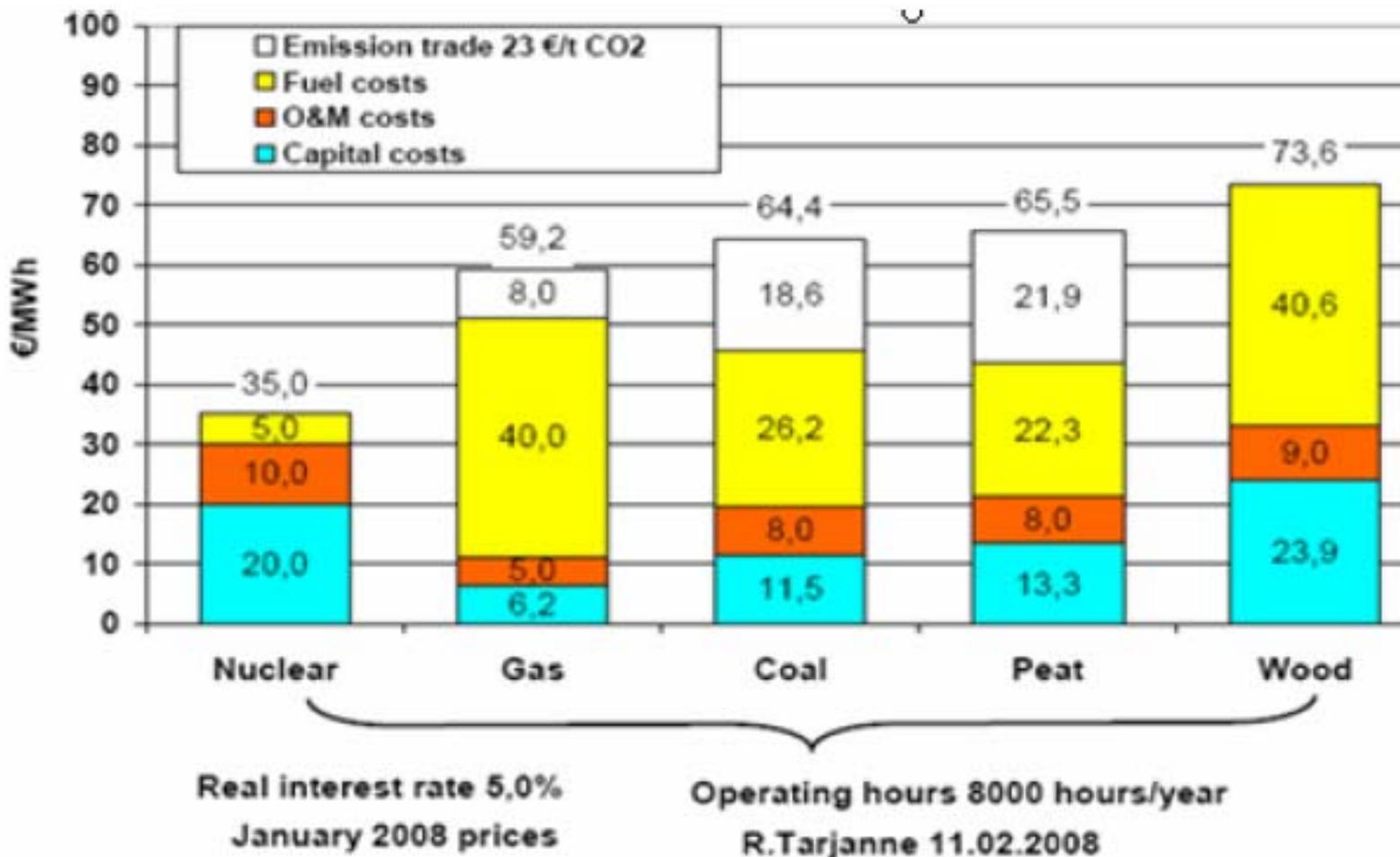
Réserves à prix < 130\$/kg U
- Limite basse 15 Mt
- Limite haute 37 Mt
(Red Book IAEA 2005)

Parc actuel 380GWe -> besoin de 76 000t/an
15 Mt -> ~200 ans

Prévision International Energy Agency (2009)
2030 -> ~ 760GWe

Avec G-III, extinction de la ressource U pendant le XXIème siècle ?

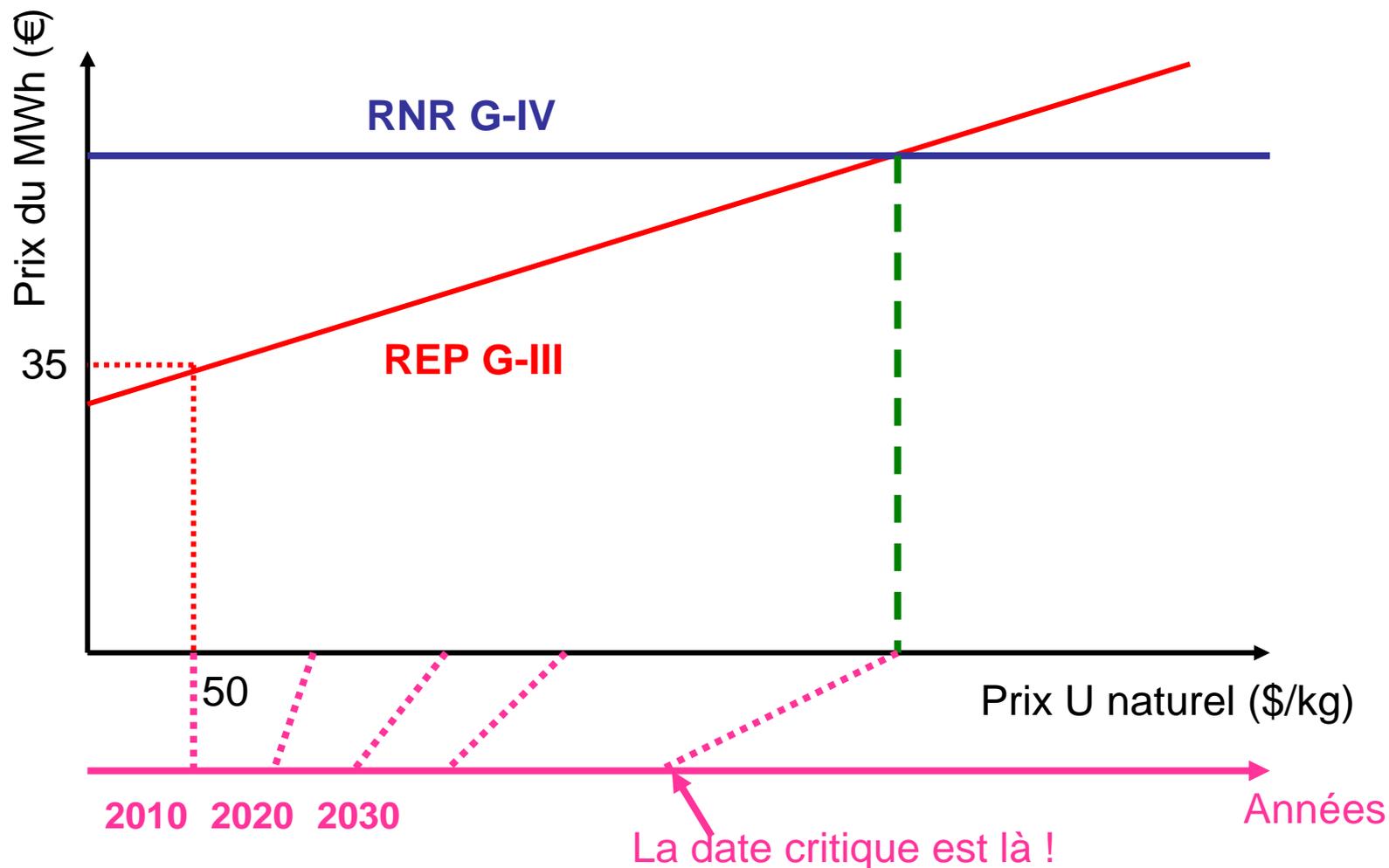
Economie, quelle « pression externe » sur GII ?





Economie, quand G-IV s'imposera à G-III ?

Diagramme pour déterminer exactement quand G-IV va surpasser G-III !



Economie, les incertitudes ne manquent pas

REP – G-III

On va avoir bientôt une idée du point représentatif de l'EPR (2012)

Mais connaît-on

- l'influence de l'effet de série sur les coûts du MW.h hors combustible ?
- les taux d'actualisation pour les investissements ?
- les diverses actions susceptibles d'améliorer le rendement donc baisser le prix du MWh à consommation d'Unat constante ? (URE, MOx, Uapp, Th ?)
- ...

RNR – G-IV

On a une idée encore plus imprécise des coûts

- de construction et de fonctionnement des RNR
- du surcôt d'adaptation des usines du cycle (fabrication du combustible, retraitement, gestion déchets)
- ...

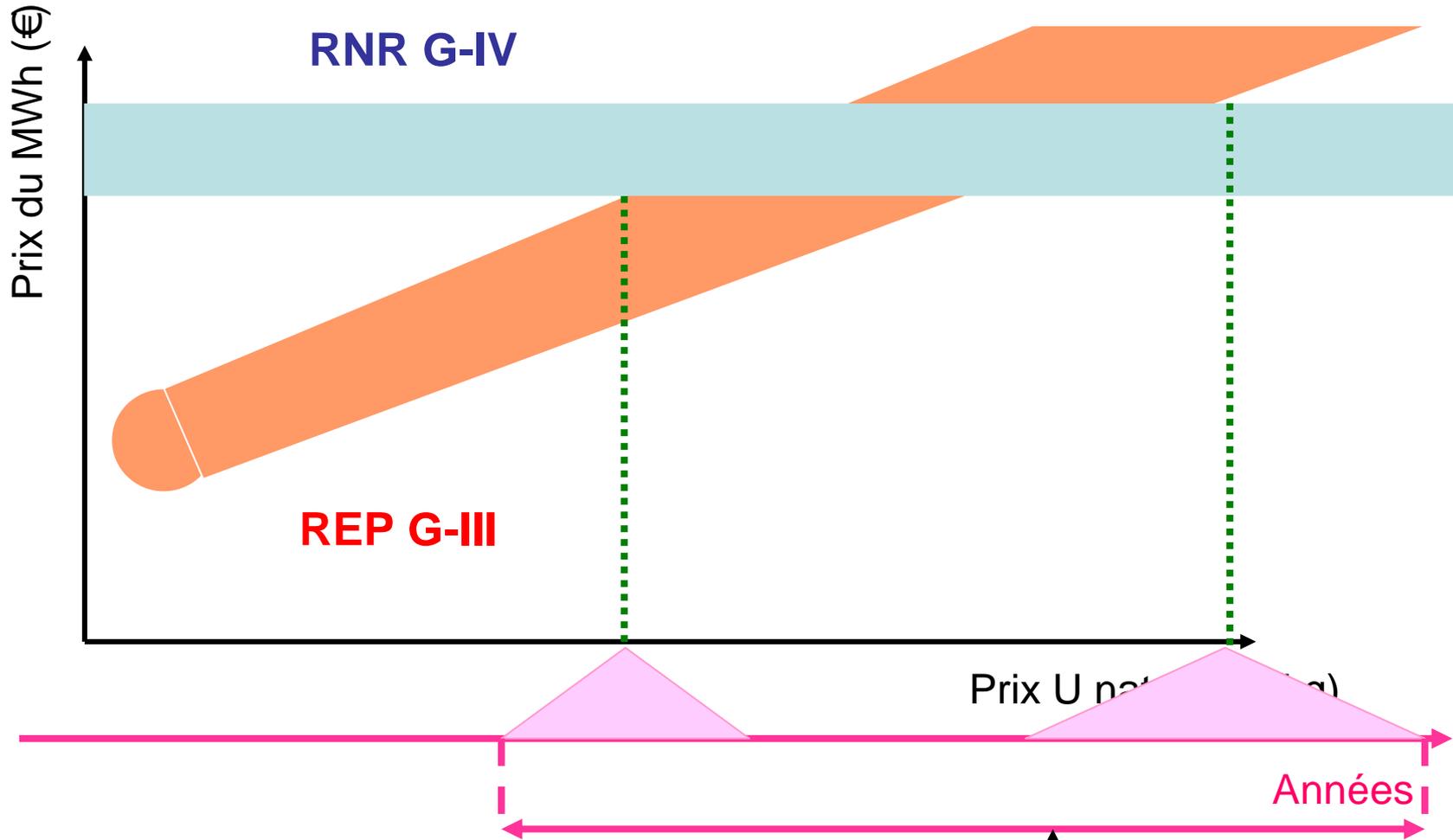
Evolution temporelle du cout du kg U

On est dans l'incertitude

- géologique sur le véritable niveau des ressources exploitables
 - géo-économique sur les ambitions nucléaires (Chine? Inde? Russie? USA?)
 - géo-politique sur les relations pays miniers, pays consommateurs
 - géo-sociale soutien ou résistance organisée à la croissance du nucléaire
-



Economie, le bon diagramme cette fois

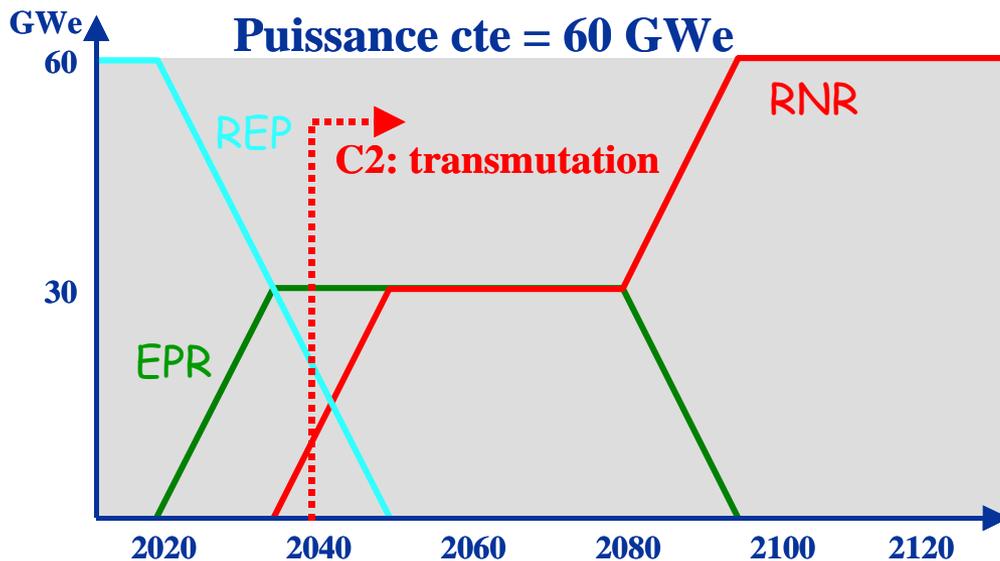


C'est absolument sûr, on aura une transition G-III -> G-IV sur cet intervalle !

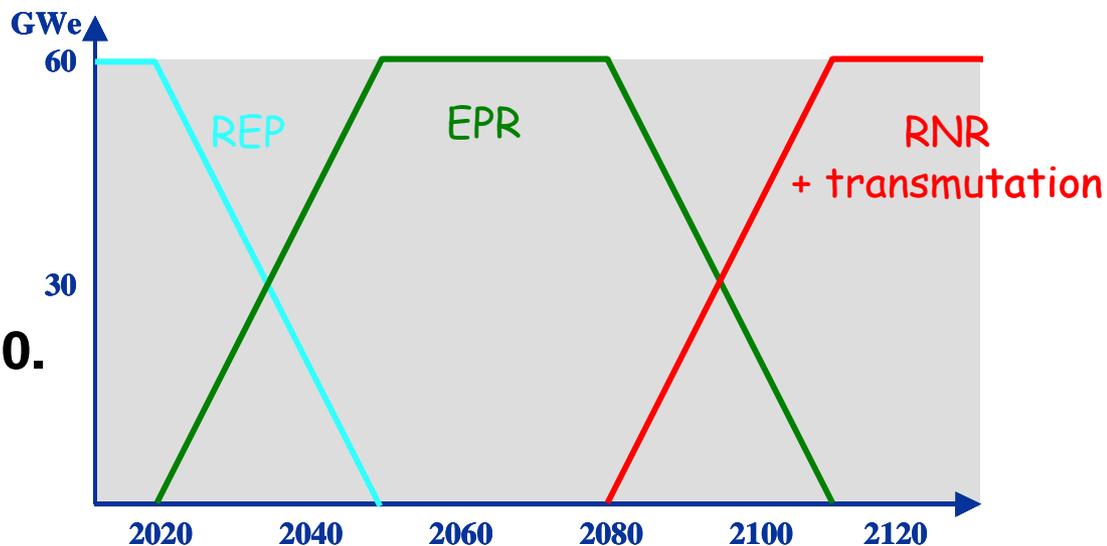


Economie, scénario, des uns, des autres

Pessimiste :
besoin impératif de passer
à G-IV dès 2040.



Optimiste :
on n'est pas pressés
G-IV peut bien attendre 2080.





Les (5+1) options retenues par le GIF

	Sigle
- RNR refroidi au sodium liquide	SFR
- RNR refroidi à l'hélium	GFR
- RNR refroidi au plomb liquide	LFR
- RNR refroidi à l'eau supercritique	SCWR ('thermique' aussi)
- RNR à sel fondus	MSFR ('thermique' aussi)
- Réacteur thermique à haute température	VHTR

Parmi les 5 systèmes RNR, si la transition GIII-G-IV doit débuter en 2040 (point de vue strictement personnel de H. Flocard),

Nomenclature «à la logiciel»

- le SFR « tient bien la corde ». G-4.0
- les GFR et LFR « suivent à distance ». G-4.3
- les SCWR et MSFR « sont plus loin ». G-4.7

**Pour une transition G-III -> G-IV plus lointaine, ils ont tous leur « chance » (J. Bouchard dixit)
(à condition qu'on travaille vraiment à les développer)**

Activités en France dans le cadre G-IV

- La stratégie de référence :

1) réalisation à l'horizon 2020 (?)

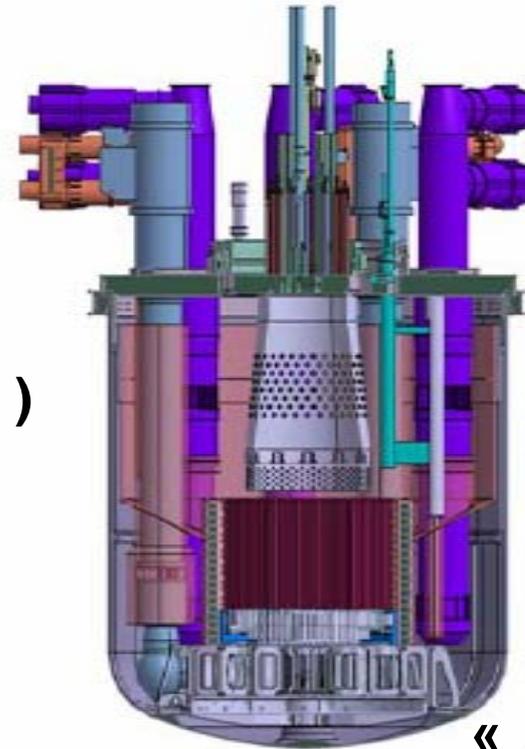
- un prototype de réacteur rapide refroidi au sodium (un dossier d'options techniques est en principe attendu pour 2012)

- un atelier de fabrication de combustible U-Pu (~t/an)

- un petit potentiel de fabrication de combustible de transmutation AM (kg)

2) participer au niveau européen au design et à la construction d'un prototype de réacteur à gaz (GFR)

3) mener une veille active sur les autres systèmes G-IV

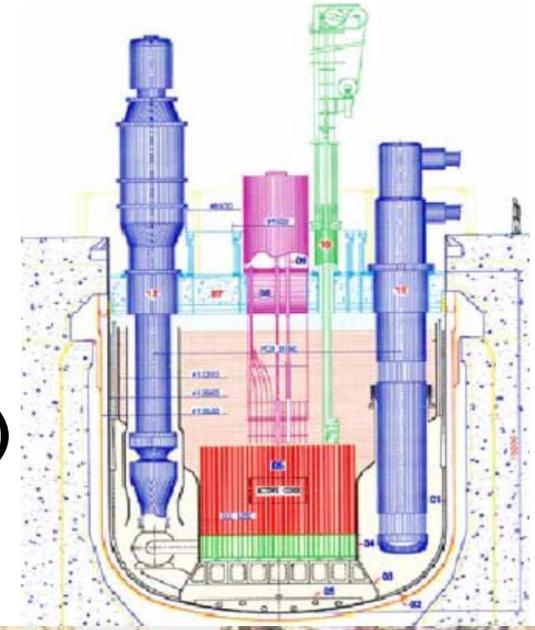


« ASTRID »

Potentiel Recherche Internationale sur G-IV

- l'OCDE
- RUSSIE
- CHINE
- INDE (pas dans GIF)

**EUROPEAN
FAST
REACTOR**
(abandonné 1990)



**Réacteur RNE-Na
Kalpakam**
(inspiré de l'EFR
démarrage 2010)





Que peut-on conclure ?

- Pour un nucléaire de fission inscrit dans la longue durée, G-IV est inévitable.
- Les options proposées par G-IV disposent de solides fondements scientifiques et techniques.
- Aujourd'hui les réacteurs G-IV ainsi que les usines du cycle associé n'existent pas. Défis majeurs : Sûreté & Economie
- « Tuer le père » : le véritable compétiteur de G-IV est G-III, pas le charbon, le gaz ou les ENR.
- Grande incertitude sur le moment où G-IV deviendra plus « avantageux » que G-III tous critères confondus.
- L'échéance possible la plus proche est « très » proche. Elle est loin d'être certaine. Quelle stratégie adopter ? pour la France ? Pour les autres nations ?

Qui vivra (assez longtemps), verra !

Merci de votre attention