

Energie nucléaire, quels systèmes pour quel futur ?



In2p3

S. David

CNRS/IN2P3

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

sdavid@ipno.in2p3.fr



Contexte énergétique

Une consommation mondiale dominée par les combustibles fossiles

source	Gtep/an (2008)
Combustibles fossiles	9.1
biomasse	1.2
Hydraulique	0.7
Nucléaire	0.6
Nouveaux renouvelables	0.02
Total	11,62

Le nucléaire en quelques chiffres :

< 6% de la production d'énergie primaire

15% de l'électricité dans le monde, en décroissance

35% de l'électricité en Europe

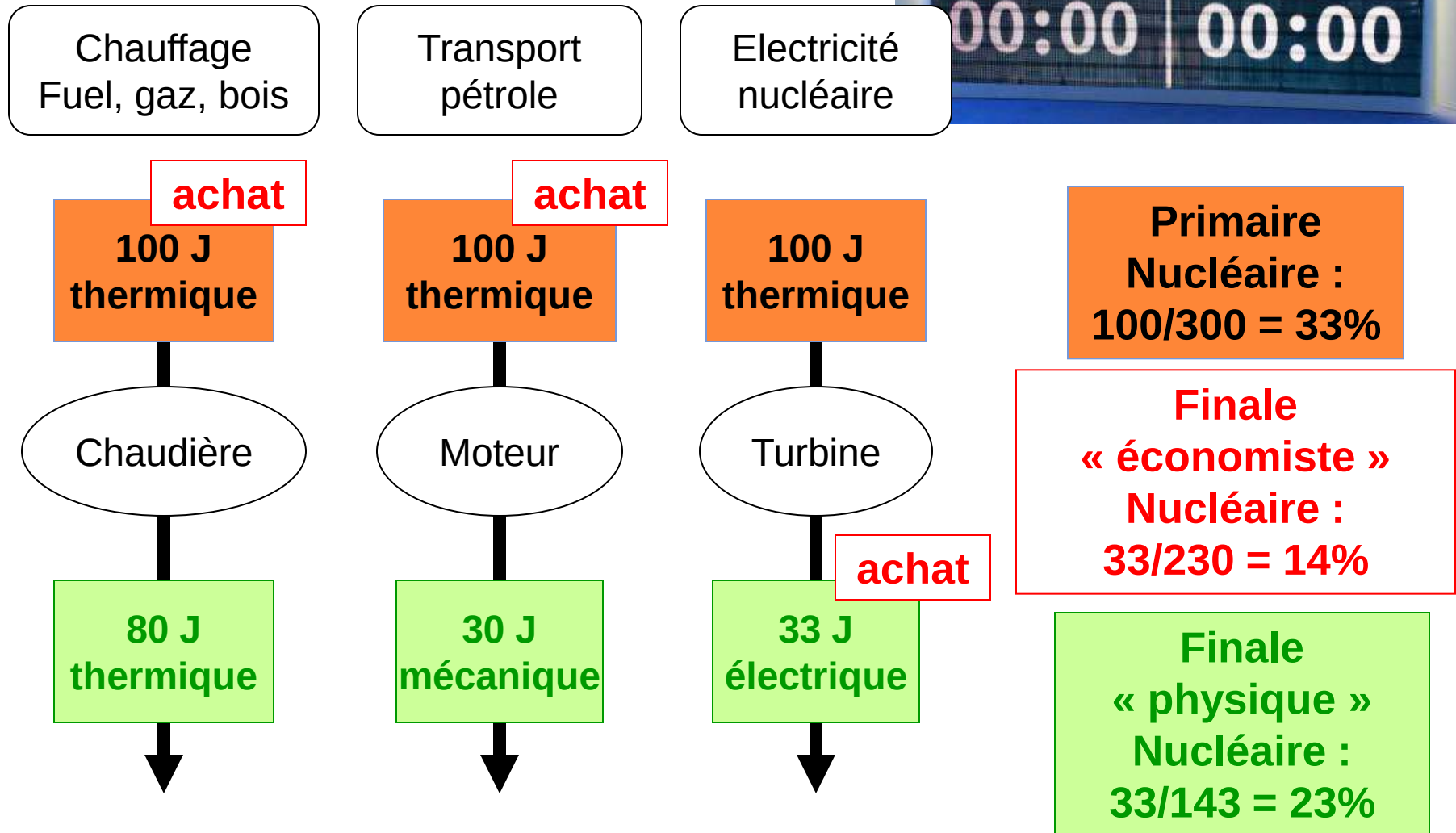
438 réacteurs de puissance fonctionnent dans 31 pays différents

Puissance installée 375 GW

Production 2009 = 2560 TWh = 292 GWe moyens

Combien de nucléaire en France ?

La grande question de l'énergie primaire et finale



Le nucléaire en France

Electricité

Nucléaire : 75 %

Electricité « primaire » (!!)

Nucléaire : 85 % (*facture EDF??*)

Energie totale primaire

Nucléaire : 39%

Energie totale finale « physique »

Nucléaire : 26 %

Energie totale finale « économiste »

Nucléaire : 17%

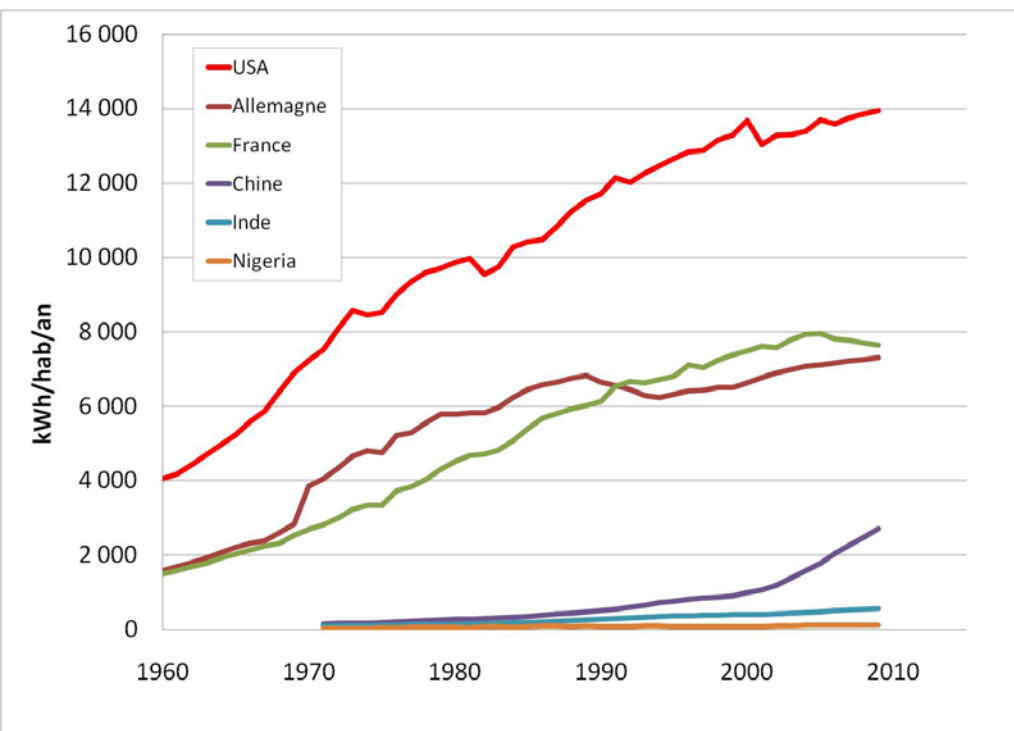
Le monde énergétique aujourd'hui

Consommation d'énergie

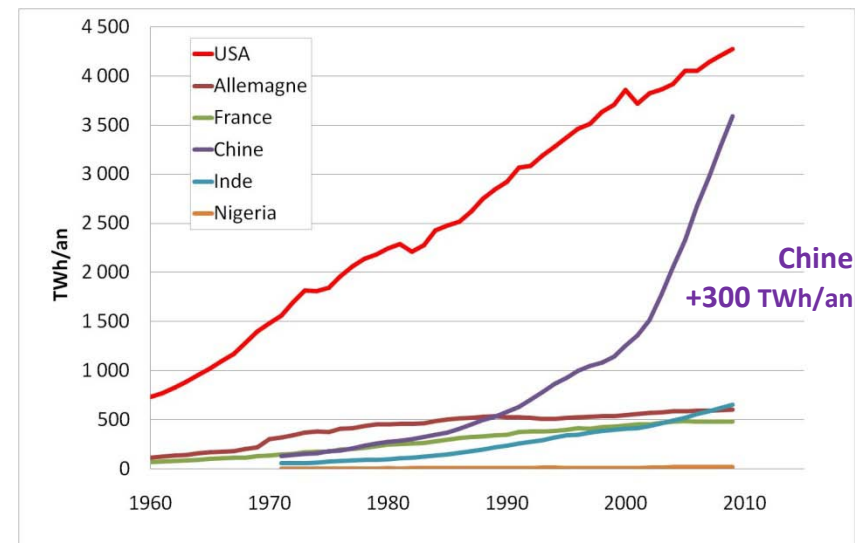
Des besoins mondiaux en énergie en forte croissance

Des inégalités de consommation gigantesques, niveaux mondial ou régional

Consommation électrique par habitant



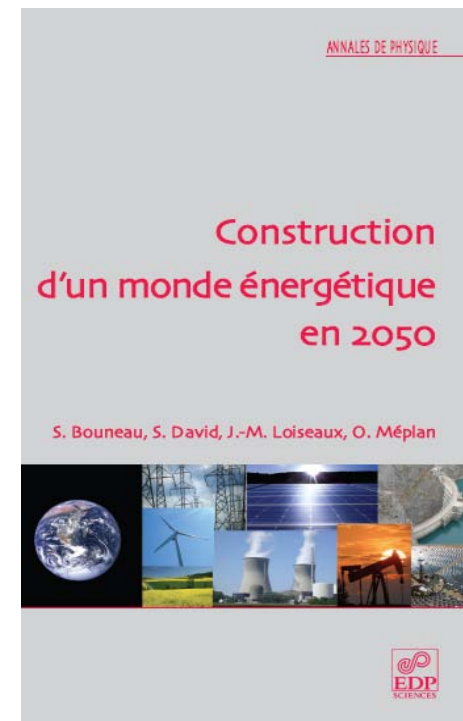
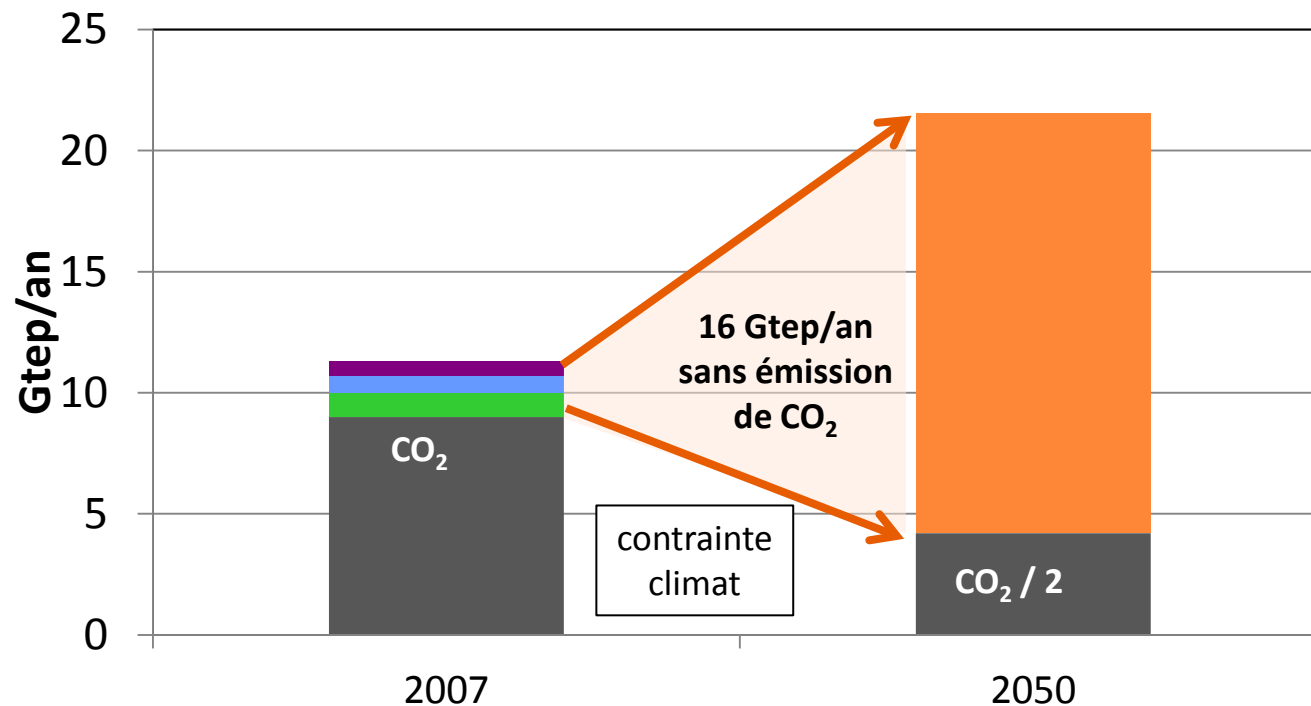
Consommation électrique totale



But de l'étude

décrire ce que pourrait être un monde « 20 Gtep/an » avec contrainte climatique

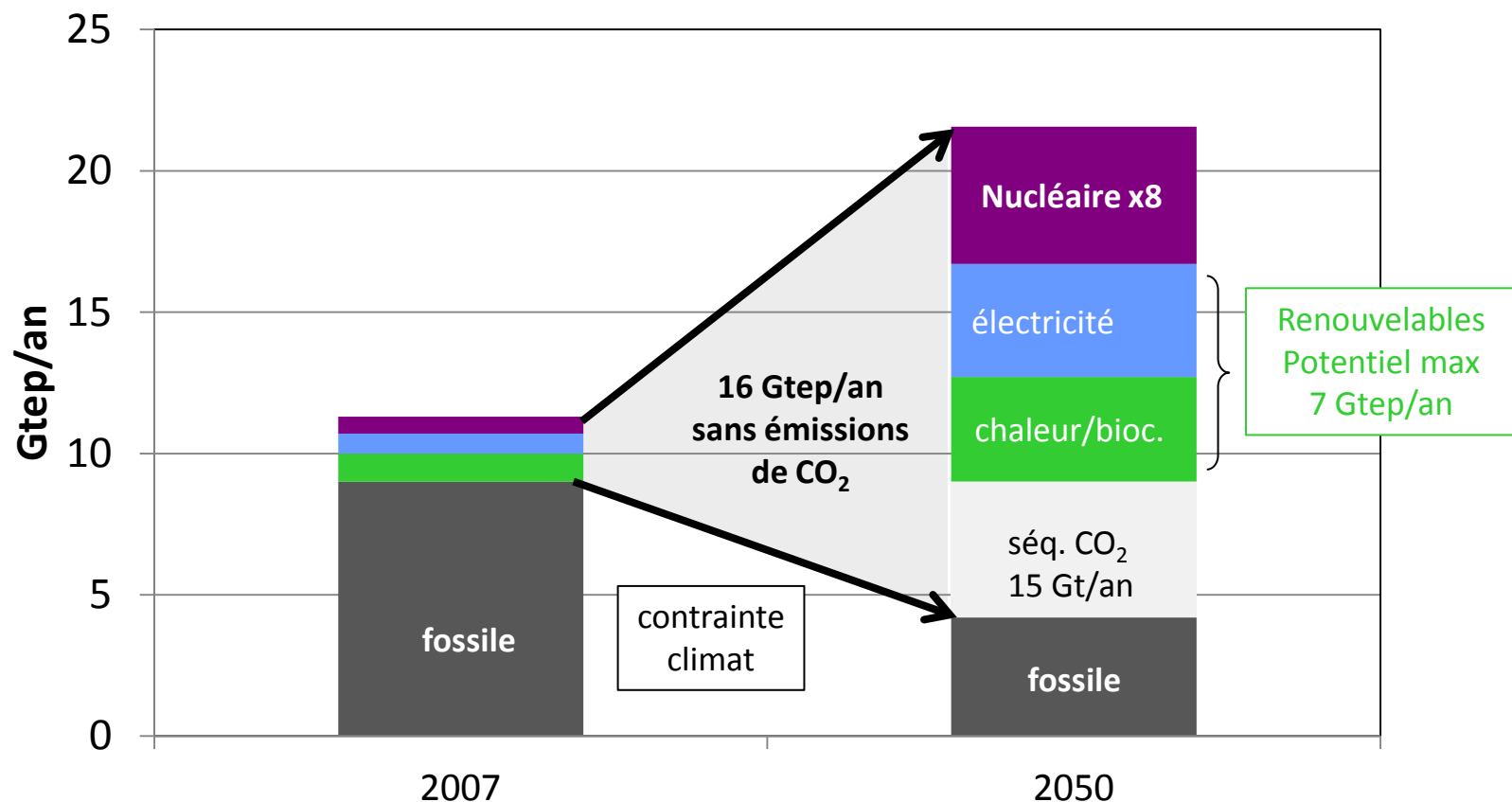
- construction « transparente », donc discutable
- contraintes explicitées
 - consommation mondiale 2050 20 Gtep/an
 - réduction d'un facteur 2 des émissions de gaz à effet de serre
 - réduction des inégalités de consommation
 - adéquation des sources et des besoins



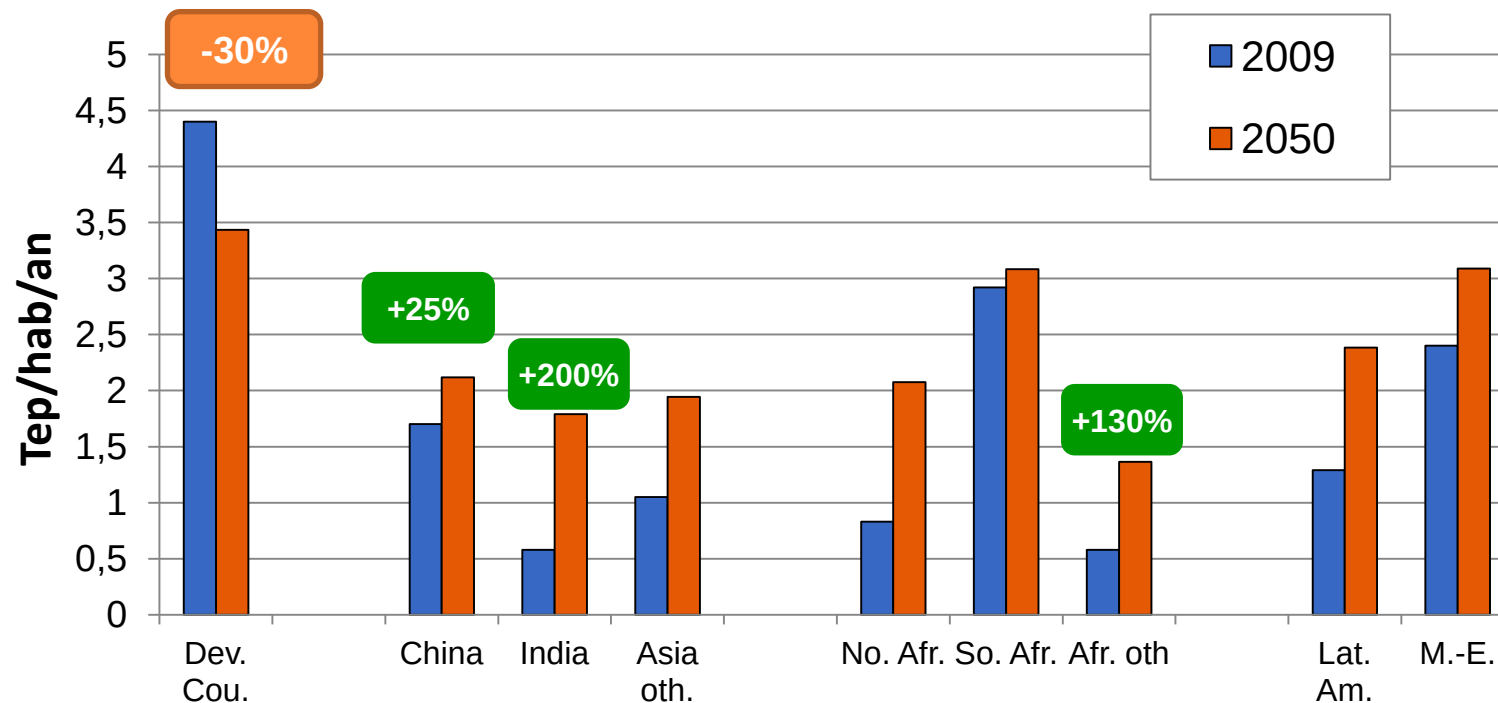
Une vision « énergie 2050 »

Construction d'un monde énergétique en 2050 (cf Sandra Bouneau)

« Enveloppe » maximale de ce qui peut être demandé au nucléaire dans les décennies qui viennent : 5 Gtep/an, soit 8 fois plus qu'aujourd'hui



Répartition de la consommation d'énergie dans le monde



Un scénario « 20 Gtep/an »

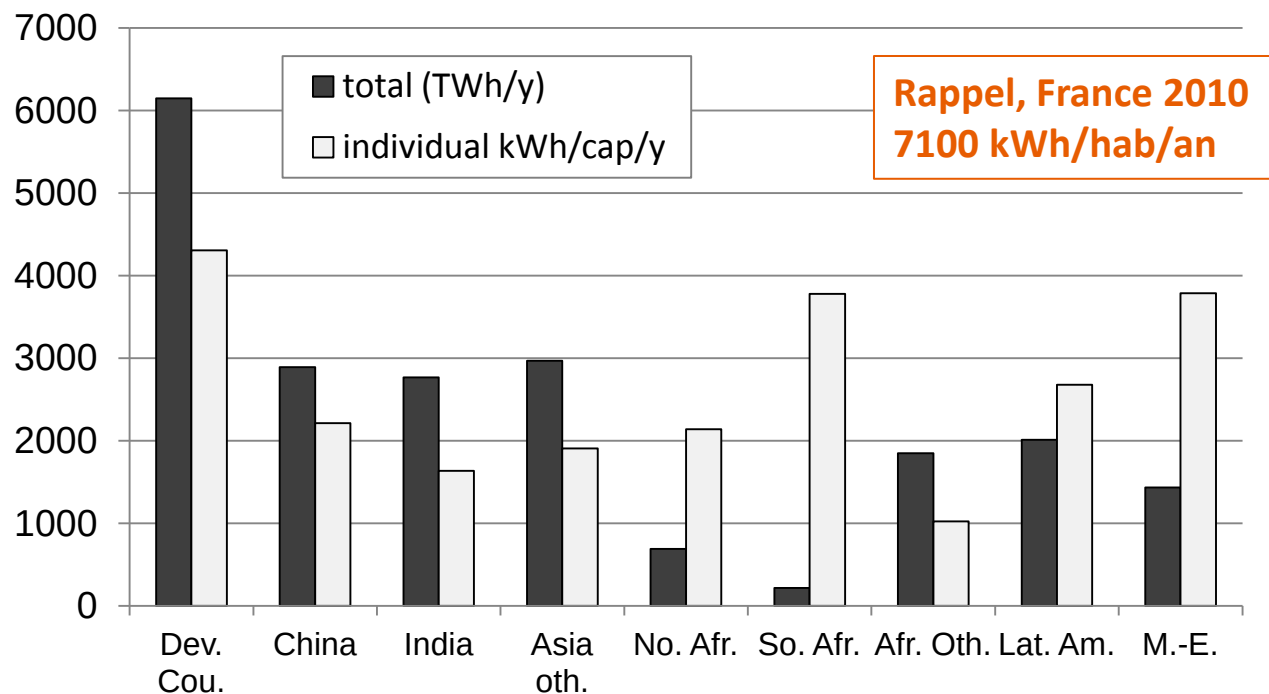
- Efforts des pays riches : réduction incompatible avec une croissance économique à +2%/an
- Une consommation dans les pays émergents encore 40% plus faible que dans les pays riches
- Une consommation en Afrique sub-saharienne qui n'excède pas 1,4 tep/hab/an en moyenne, et inférieure à 1 tep/hab/an dans les zones rurales

L'acceptabilité sociale d'un scénario 20 Gtep/an se pose

Résultats : Focus sur le nucléaire

Nucléaire x8 au niveau mondial

Répartition géographique
« par habitant »



Rappel : cas français ~60 réacteurs en 20 ans pour 60 Mhab

D'ici 2030, la croissance du nucléaire sera très faible, si déploiement il y a, ce sera après 2030

440 → 2000 réacteurs entre 2030 et 2050 : ~2500 réacteurs à construire en 30 ans = 80/an

Population concernée : urbains des pays développés et émergents = 6 Ghab

France 1075-1995 appliquée à 6Ghab = 6000 réacteurs en 20 ans...

Les thèmes abordés

D'abord quelques rappels du fonctionnement des centrales actuelles

Consommation et ressources en uranium

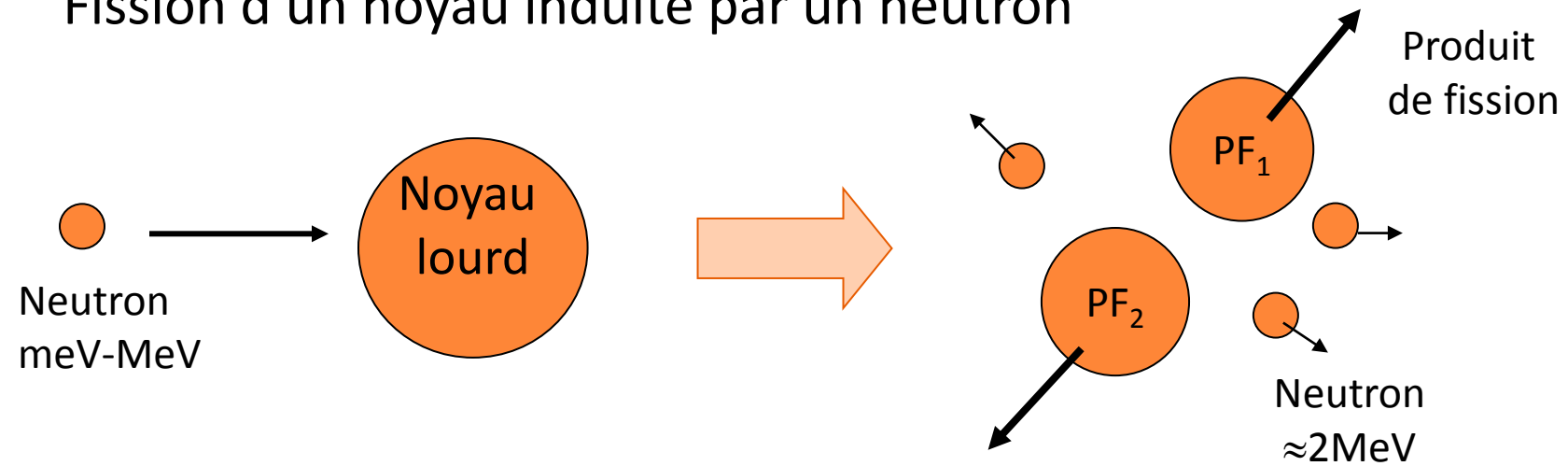
La surgénération : filières, transition gen3/gen4

Le statut du plutonium

La transmutation des déchets

Un mot sur le cycle innovant du thorium

Fission d'un noyau induite par un neutron



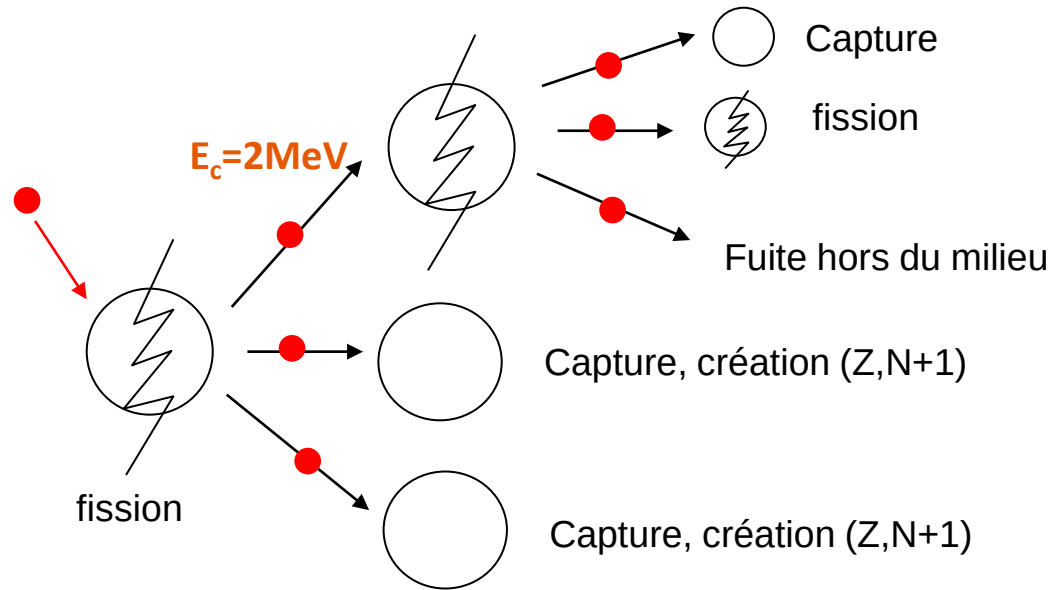
$$M > M_1 + M_2 + 3M_n$$

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



1 réacteur de 1GWe
Fournit 1 millions de personnes
Fissionne 1 tonne de matière /an
~ 1g/an par personne

Les neutrons issus des fissions produisent à leur tour des fissions



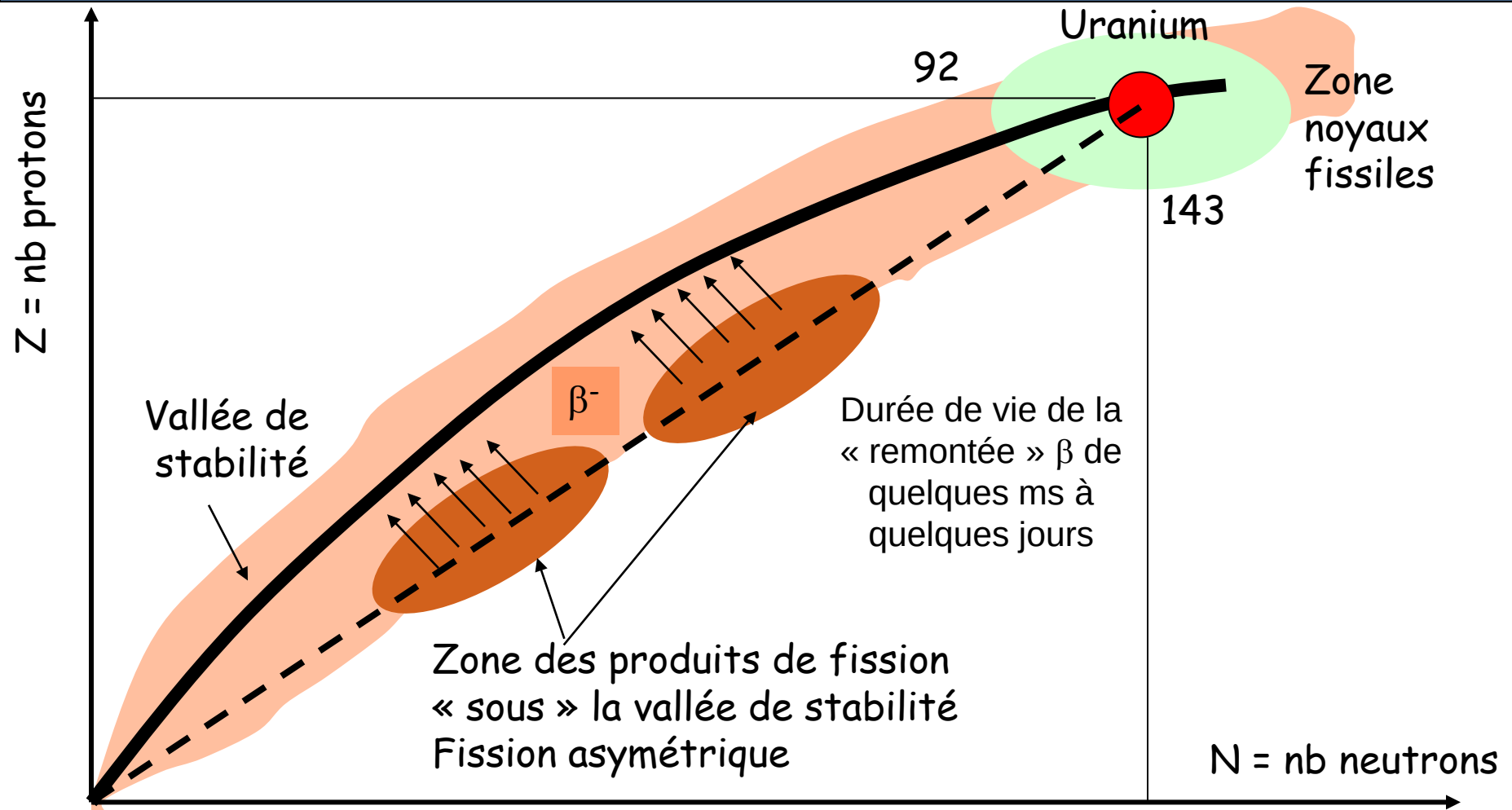
Réaction en chaîne : 1 fission $\rightarrow$ 1 fission $\rightarrow$ 1 fission $\rightarrow$ 1 fission $\rightarrow$...

Puissance constante

Pilotage possible du réacteur :

contre-réactions : si ça s'emballe, $P \uparrow$, $T \uparrow$, fission $\downarrow$, et $P \downarrow$, le système se stabilise
neutrons retardés (qq sec.) : donnent le temps d'intervenir (barres de contrôle)

formation des produits de fission



Deux conséquences fondamentales :

- ☺ Production de neutrons retardés pendant la « remontée » β qui permettent de piloter le réacteur
- ☹ Puissance résiduelle après l'arrêt du réacteur

Quelques rappels de base

Seuls les noyaux lourds (actinides, $Z > 90$) fissionnent, et seuls les « impairs en neutrons » fissionnent « facilement »

ZOOM sur les actinides : 3 actinides naturels ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th

[illegible]

Seul l' ^{235}U est fissile (impair en neutrons) ... il représente 0,72% de l'uranium naturel

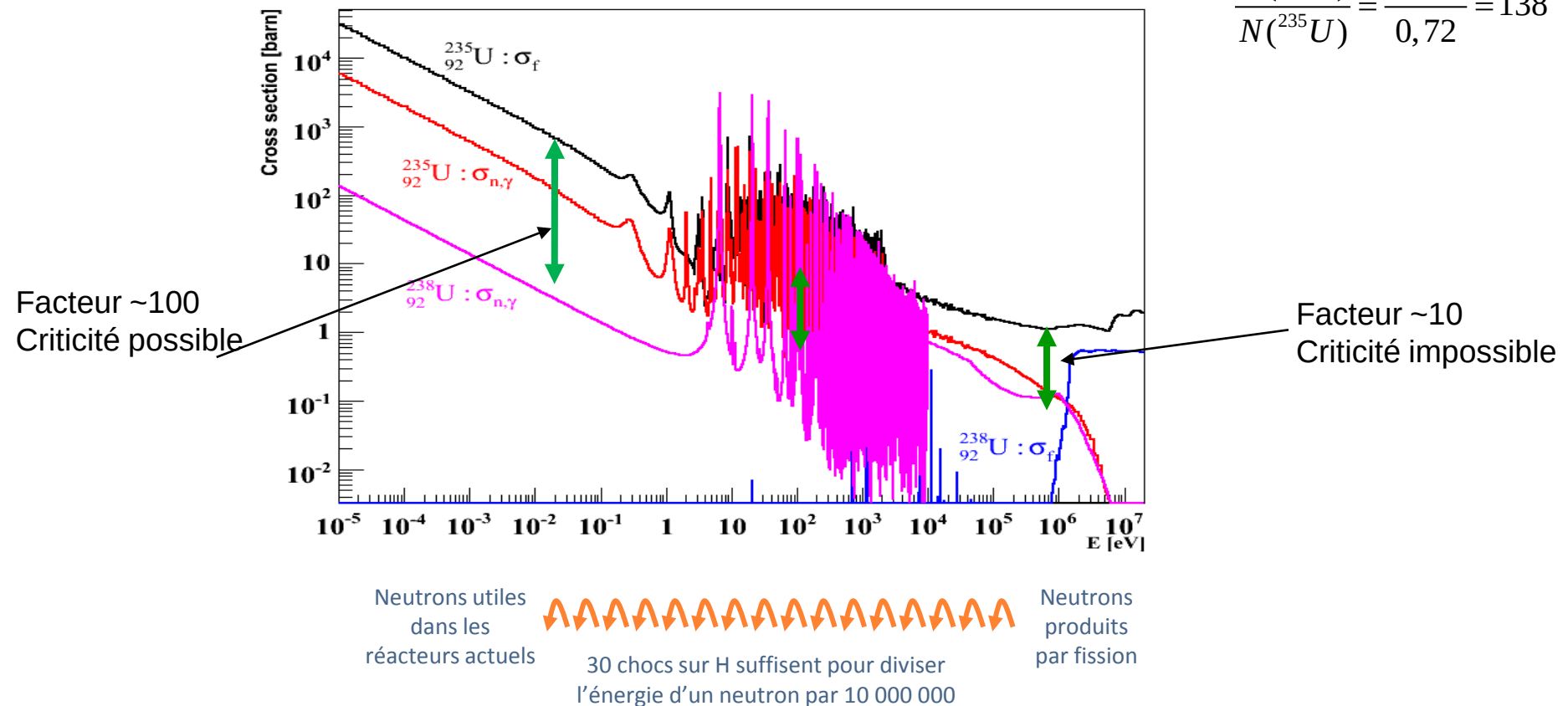
Pourquoi doit-on ralentir les neutrons ?

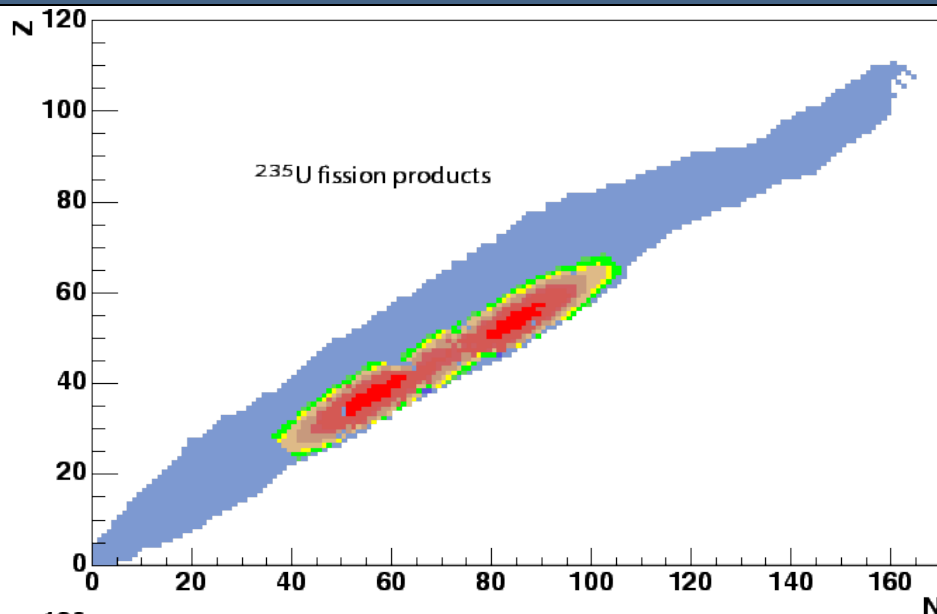
Utiliser l' ^{235}U nécessite de ralentir les neutrons

Les neutrons de fission sont émis à ~ 2 MeV

À basse énergie ($< 1\text{eV}$), la section efficace de fission de l' ^{235}U est suffisamment élevée pour compenser l'absorption de l' ^{238}U et permettre ainsi de maintenir la réaction en chaîne

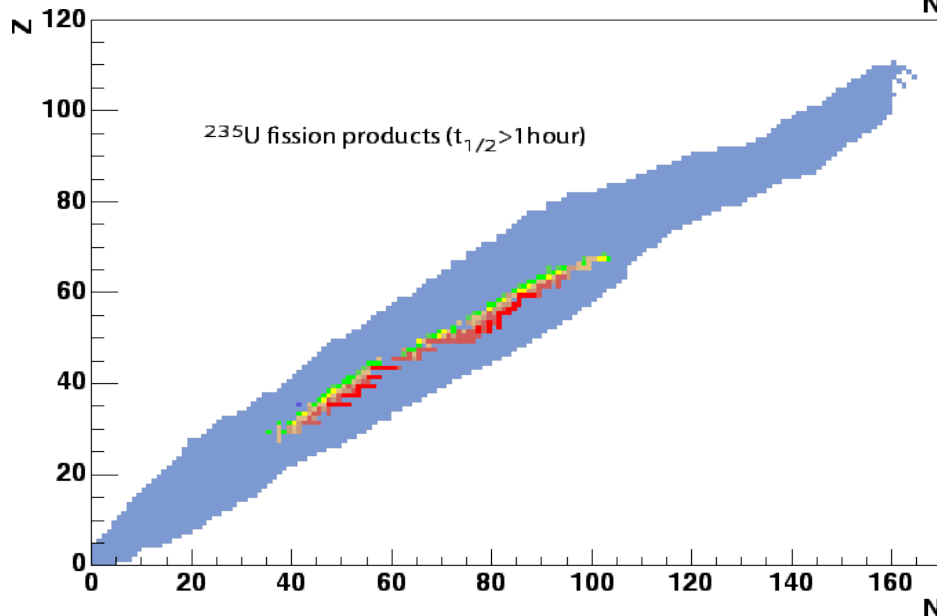
$$\frac{N(^{238}\text{U})}{N(^{235}\text{U})} = \frac{99,28}{0,72} = 138$$





À l'arrêt de la réaction en chaîne, 10% de la puissance nominale est encore produite, alors qu'il n'y a plus de fissions

Il faut refroidir le cœur pendant plusieurs semaines, sous risque de fusion (TMI, Tchernobyl, Fukushima)



Déchets nucléaires : les produits de fission « chauffent » encore pendant des siècles, ce qui limite la capacité de stockage d'un site donné

Principe général de fonctionnement d'un réacteur

Production d'énergie thermique par fission dans le **cœur** du réacteur

Eau : modérateur et caloporteur

Combustible : Uranium enrichi (3,5% ^{235}U)

Températures

Combustible $\sim 1500^\circ\text{C}$

Circuit primaire

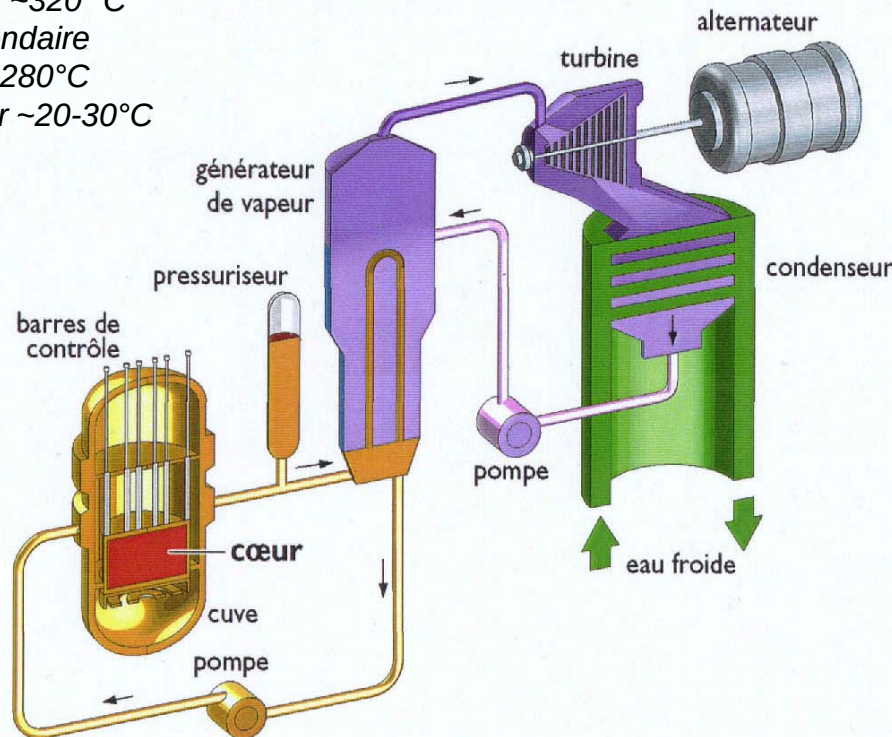
Entrée cœur $\sim 280^\circ\text{C}$

Sortie cœur $\sim 320^\circ\text{C}$

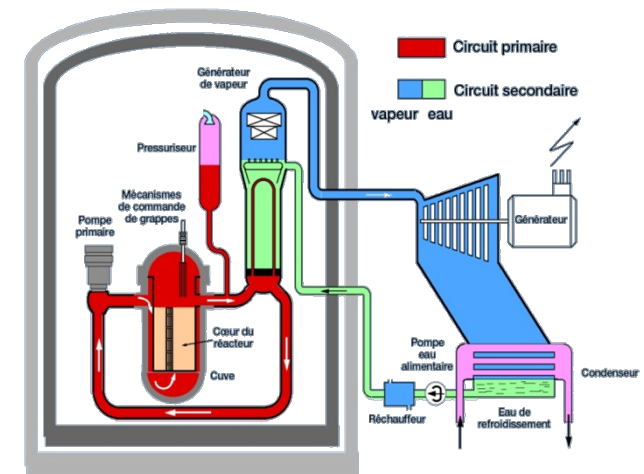
Circuit secondaire

Sortie GV $\sim 280^\circ\text{C}$

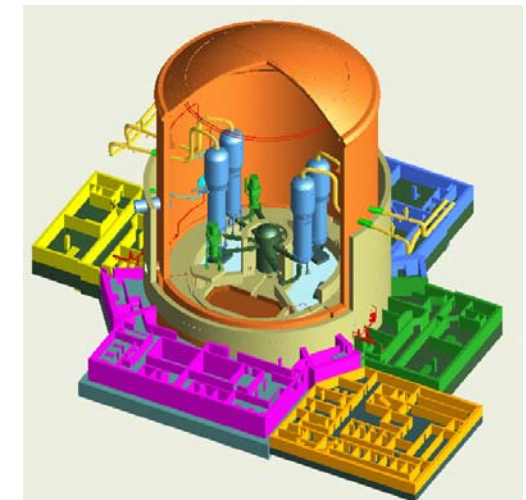
Condenseur $\sim 20\text{-}30^\circ\text{C}$



REP, Gen2

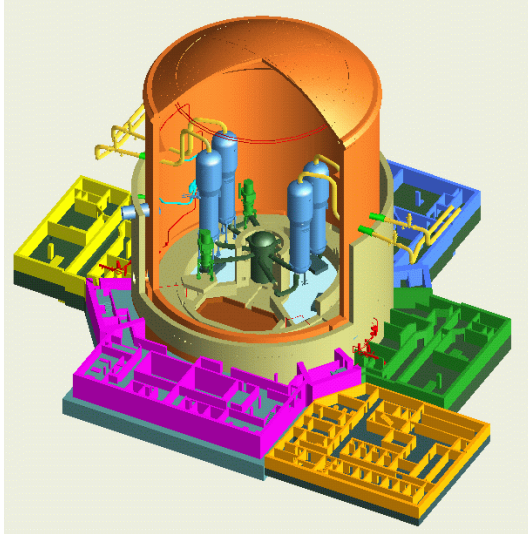


EPR, Gen3



Filières nucléaires actuelles

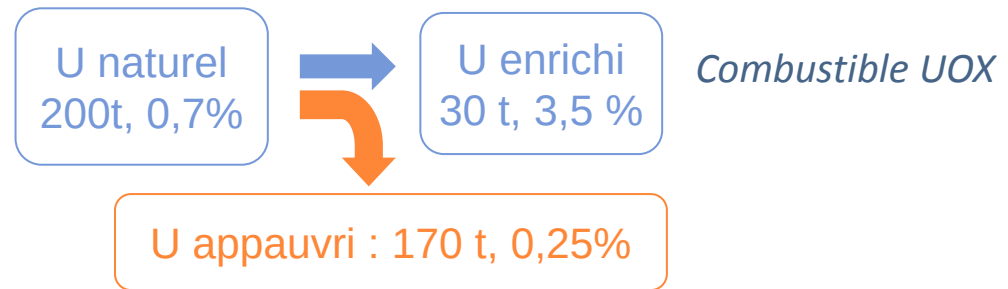
Technologie REP, EPR



Consommation

Fission 200 MeV = 1 t / GWe.an

Ce qui nécessite beaucoup plus d'U nat



Combustible UOX utilisé

USA : déchet

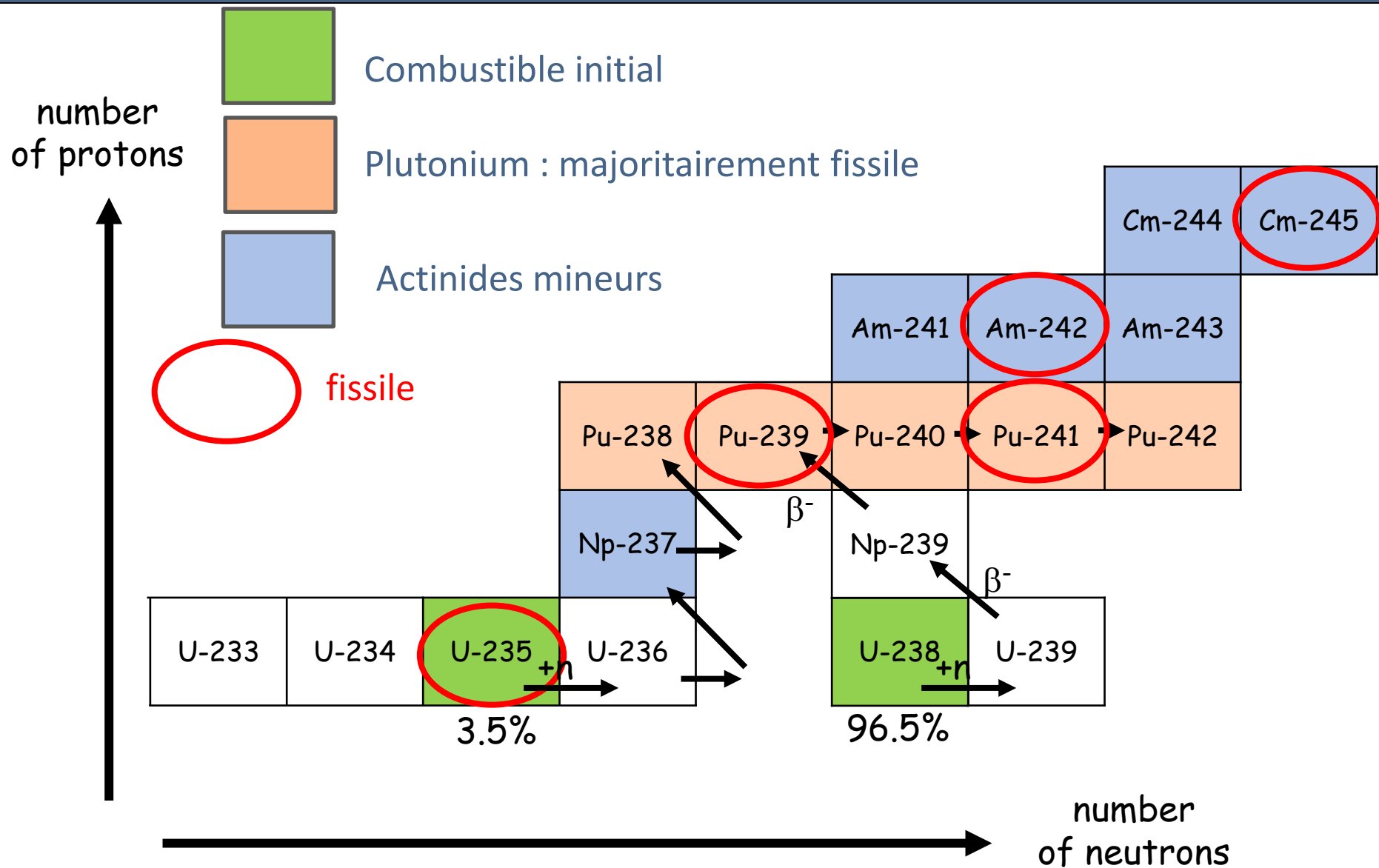
France : retraitement

U : encore 1% d' ^{235}U (1200 $\rightarrow$ 350 kg)

Pu : $\sim$ 1%, 330 kg, matière fissile (capture sur ^{238}U)

Actinides mineurs : Am, Cm, Np, 25 kg

Produits de fission : 1000 kg dont 100 kg sont radioactifs



Filières nucléaires actuelles

Le retraitement des UOX
Schéma simplifié

Combustible UOX irradié

Uranium

Plutonium

Produits de fission
Actinides mineurs

Structures
(coques et embouts)

Recyclage en
comb. URE :30%
Entreposage : 70%

Recyclage en
comb. MOX
 U_{app} / Pu

*Une fois réutilisé en
REP, les MOX usés ne
sont pas retraités*

Vitrification

Déchets
haute activité
vie longue
HA-VL

Destination stockage

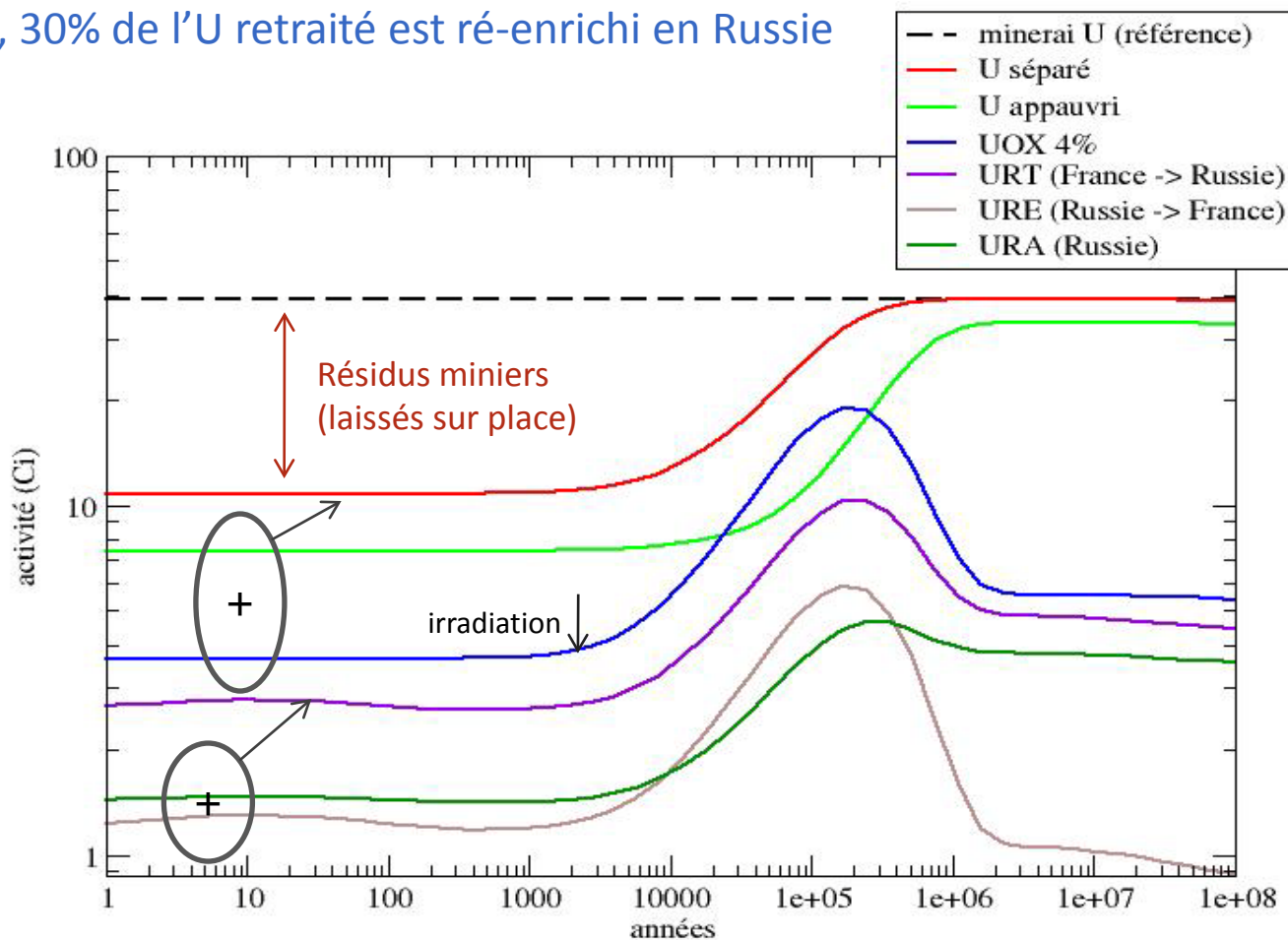
Compactage

Déchets
moyenne activité
vie longue
MA-VL

Radioactivité des « différents » uranium

Normalisé pour 1 tonne d'U enrichi

Aujourd'hui, 30% de l'U retraité est ré-enrichi en Russie

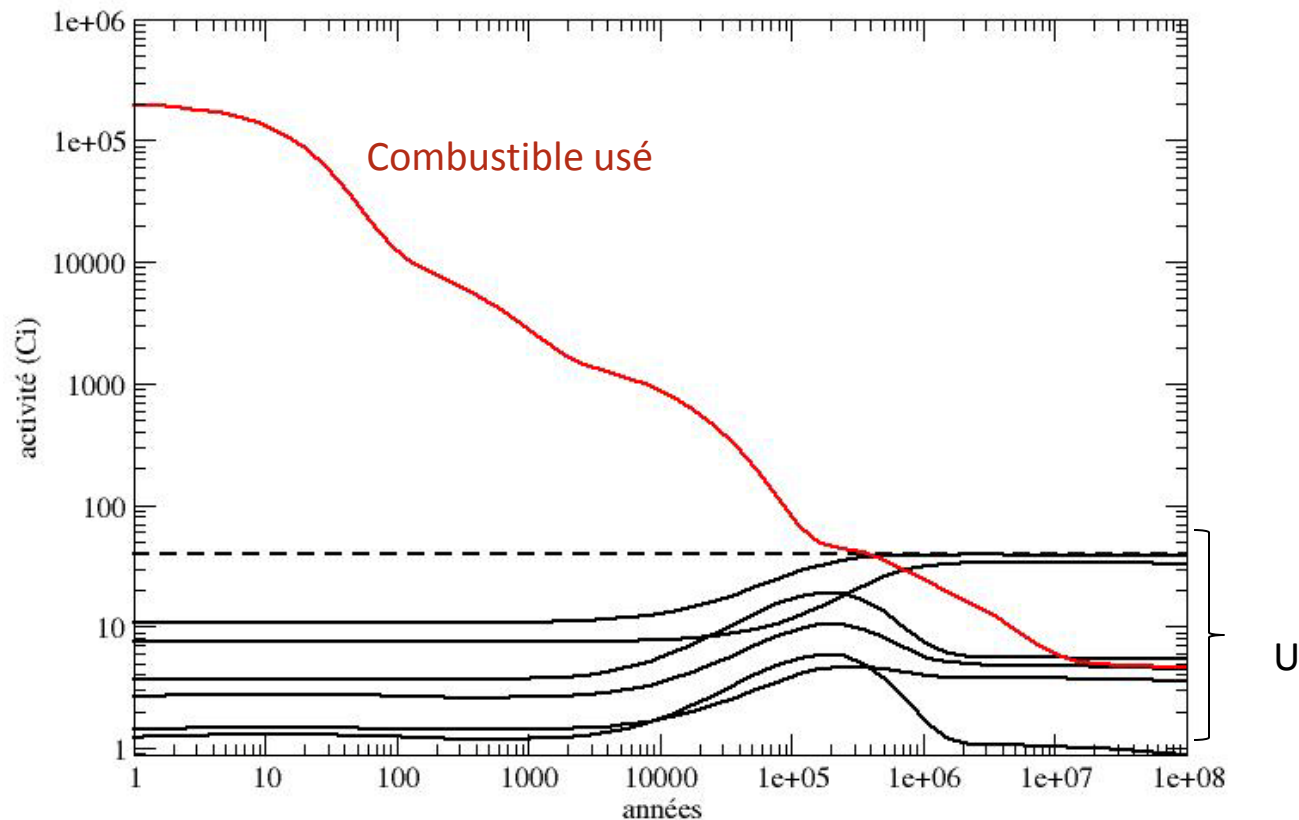


On peut « s'interroger sur les interrogations » liées au ré-enrichissement de l'uranium en Russie...

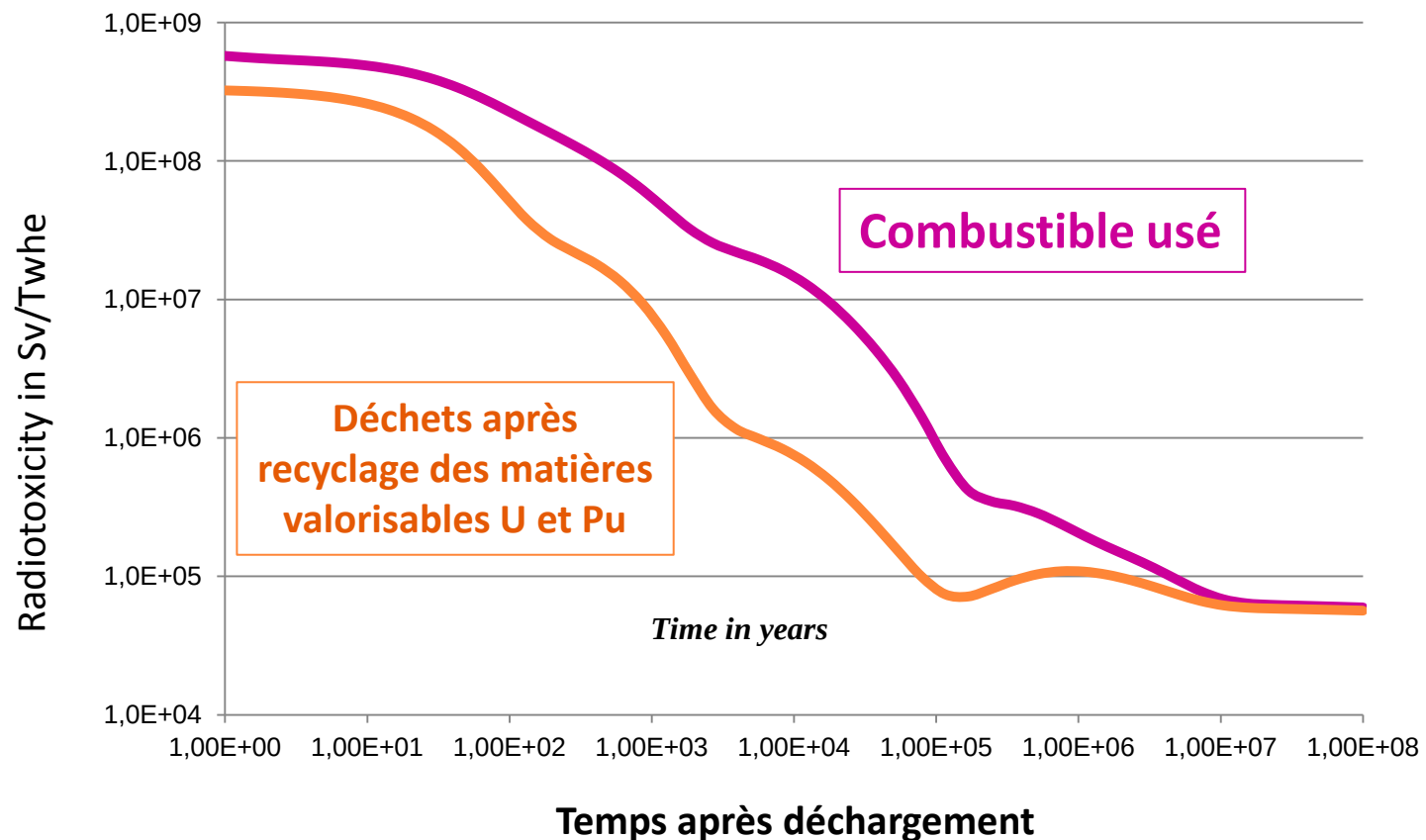
Filières nucléaires actuelles

Et ne pas oublier que la quasi-totalité de la radioactivité est contenue dans le combustible usés, et notamment le plutonium

Ces combustibles usés se transportent également (La Hague $\leftrightarrow$ centrales, La Hague $\leftrightarrow$ Marcoule, France $\leftrightarrow$ Japon, France $\leftrightarrow$ Allemagne,, ...)



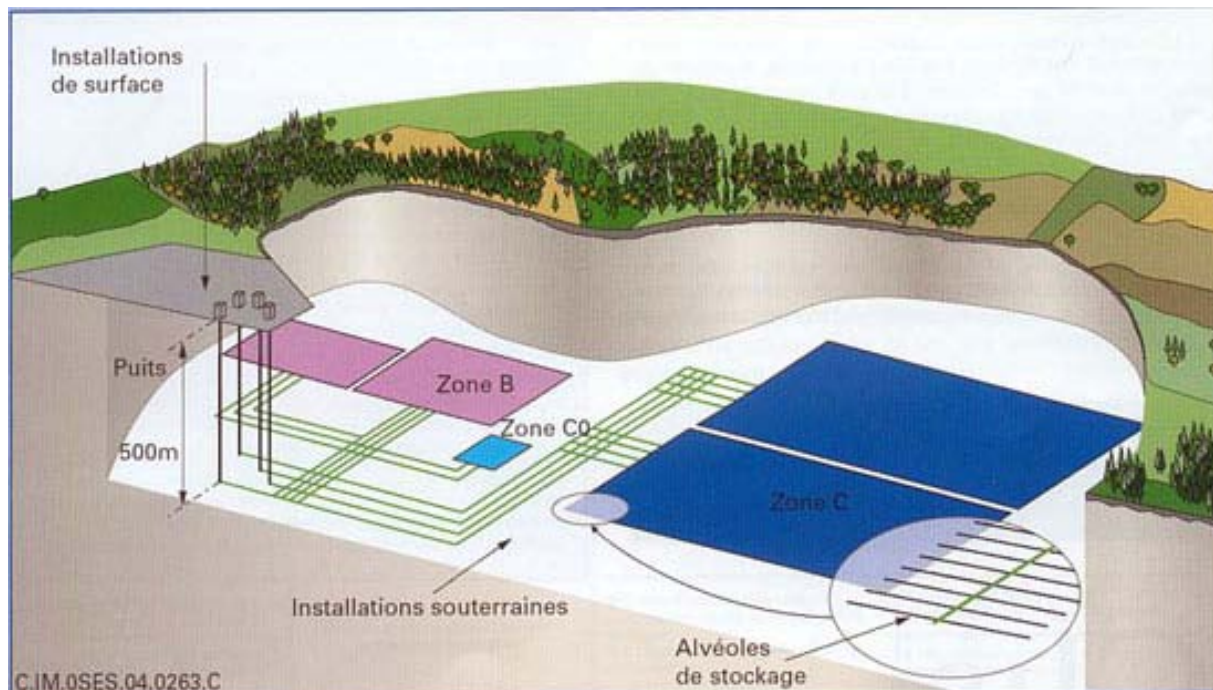
La quasi-totalité de la radiotoxicité à long terme du combustible utilisé est due au plutonium, qui ne se trouve pas dans les déchets



Gestion des déchets ultimes : l'option stockage

- Vitrification considérée comme irréversible
- Stockage couche argile 500 mètres sous terre
- Un stockage est par conception irréversible
- Surface 300 ha pour les verres HAVL (évacuation de la chaleur résiduelle)
- Option de référence en France (loi de 2006), **décision 2013 ?**
- **Seuls les verres sont concernés, et pas les MOX usés qui contiennent le Pu**

Site de Bure



1ha en subsurface (La Hague)



>300 ha sous terre afin de
limiter la température des
colis

*(plus d'évacuation de chaleur
par convection)*

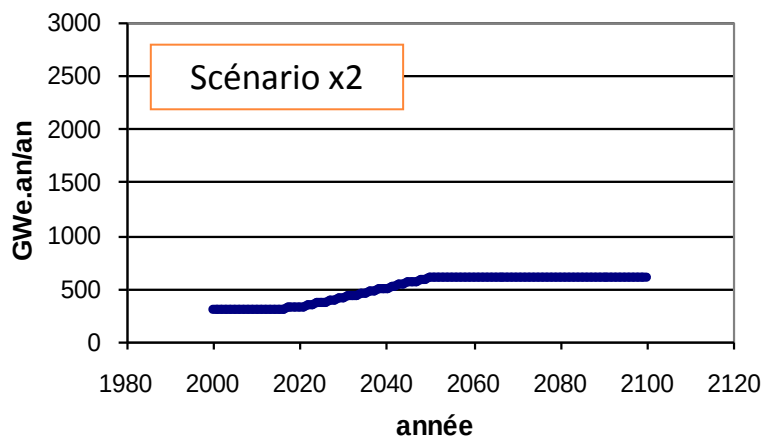
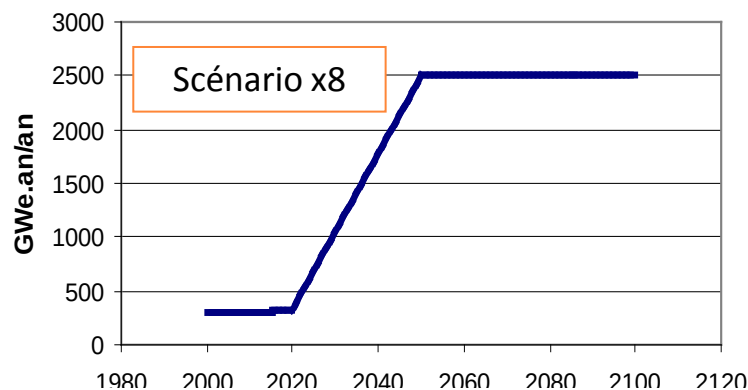
Des positions difficiles à comprendre

	Confiance dans la société	
	OUI	NON
<u>Les « pro-nucléaires »</u>		
- plutôt pour le stockage		✓
- pour un développement du nucléaire durable	✓	
<u>Les « anti-nucléaires »</u>		
- pour l'entreposage	✓	
- contre le nucléaire pour des raisons d'instabilité des sociétés		✓

Potentiel des filières actuelles

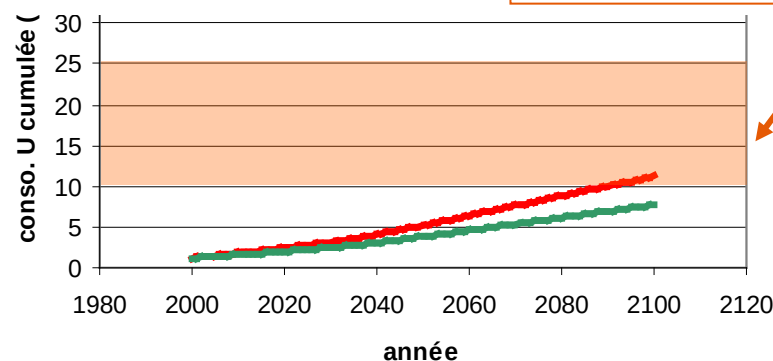
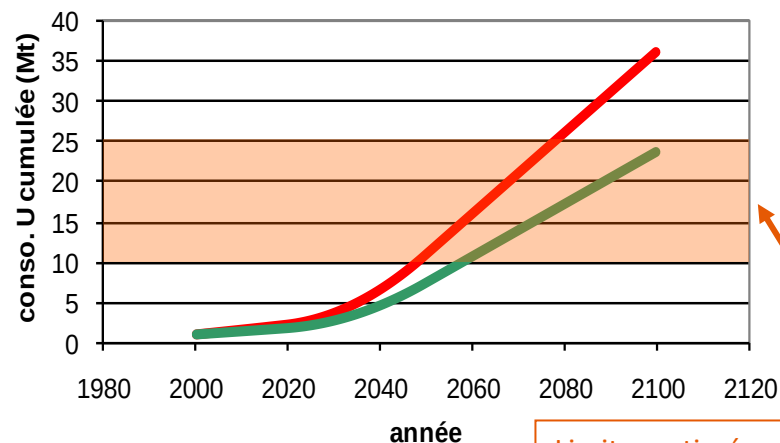
Scénario 100% Gen2 + Gen3

Demande nucléaire mondiale



— 200t/(GWe.an)
— 130t/(GWe.an)
↘ rejet ^{235}U dans U_{app} , recyclage U, Pu

Consommation cumulée d'U naturel



Nucléaire du futur

Filières actuelles

Basée sur ^{235}U = 0,7% de U nat

Seul noyau fissile naturel

Consommation pour 1 GWe.an

fissionné	1 t
U enrichi 4%	27t
<u>U naturel</u>	<u>200 t</u>

Possibilité de réduire à 130t/GWe.an

réduction ^{235}U dans U appauvri

recyclage U

recyclage Pu

Sans rupture technologique

Filières régénératrices



Noyau
fertile

Noyau
fissile

Le Pu fissionné est régénéré : Masse Pu = cte

Seul l' ^{238}U est consommé : 1 t / (GWe.an)

U appauvri français 300000 t

→ 5000 ans de production d'électricité

Masse de Pu à fournir au départ ~17 t/ GWe

Cas français : 1100 t de Pu pour 60 GWe

Inventaire Pu disponible en 2010 ~ 300t

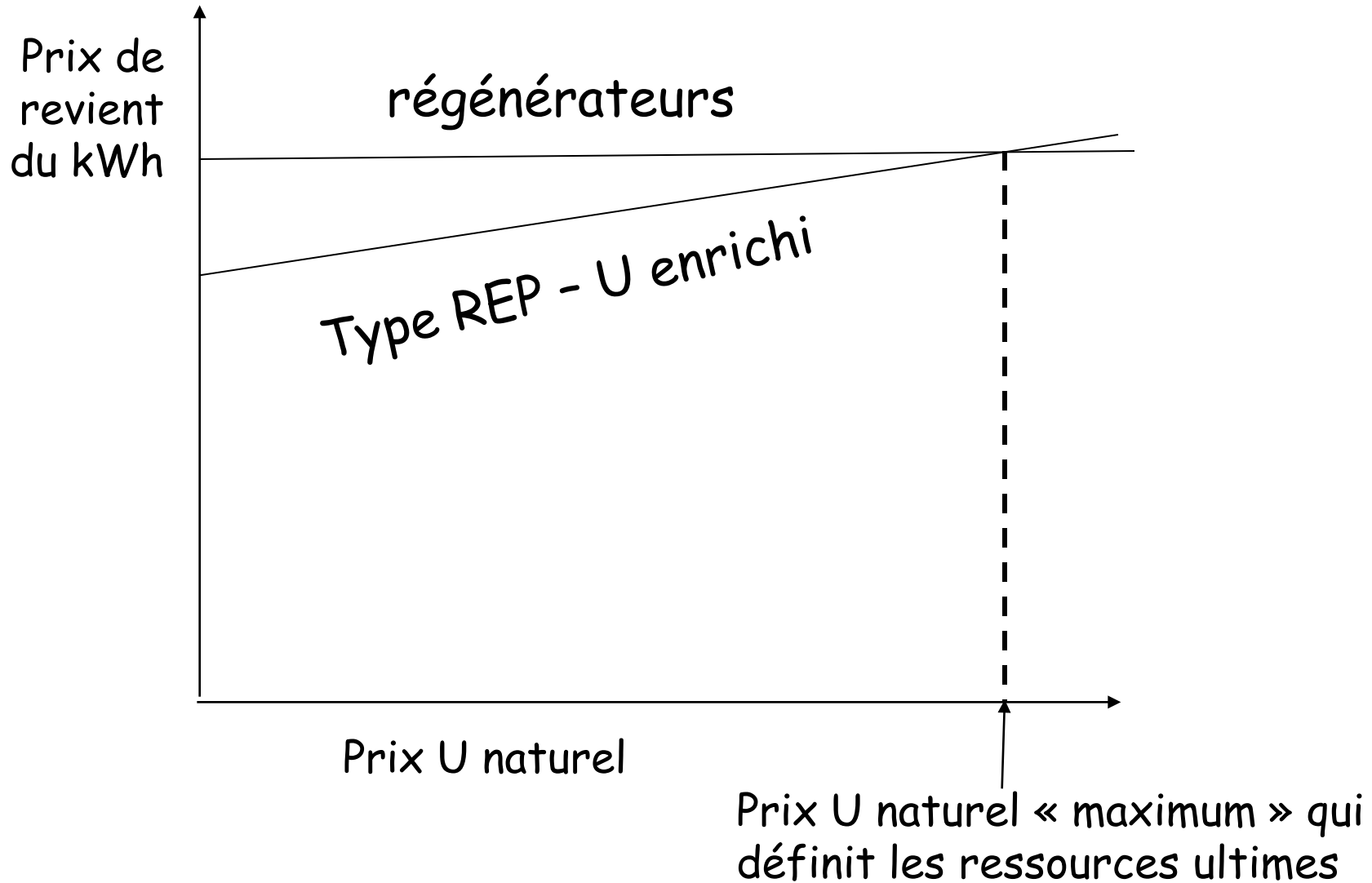
Technologie plus complexe (donc plus chère)

Réacteurs à neutrons rapides

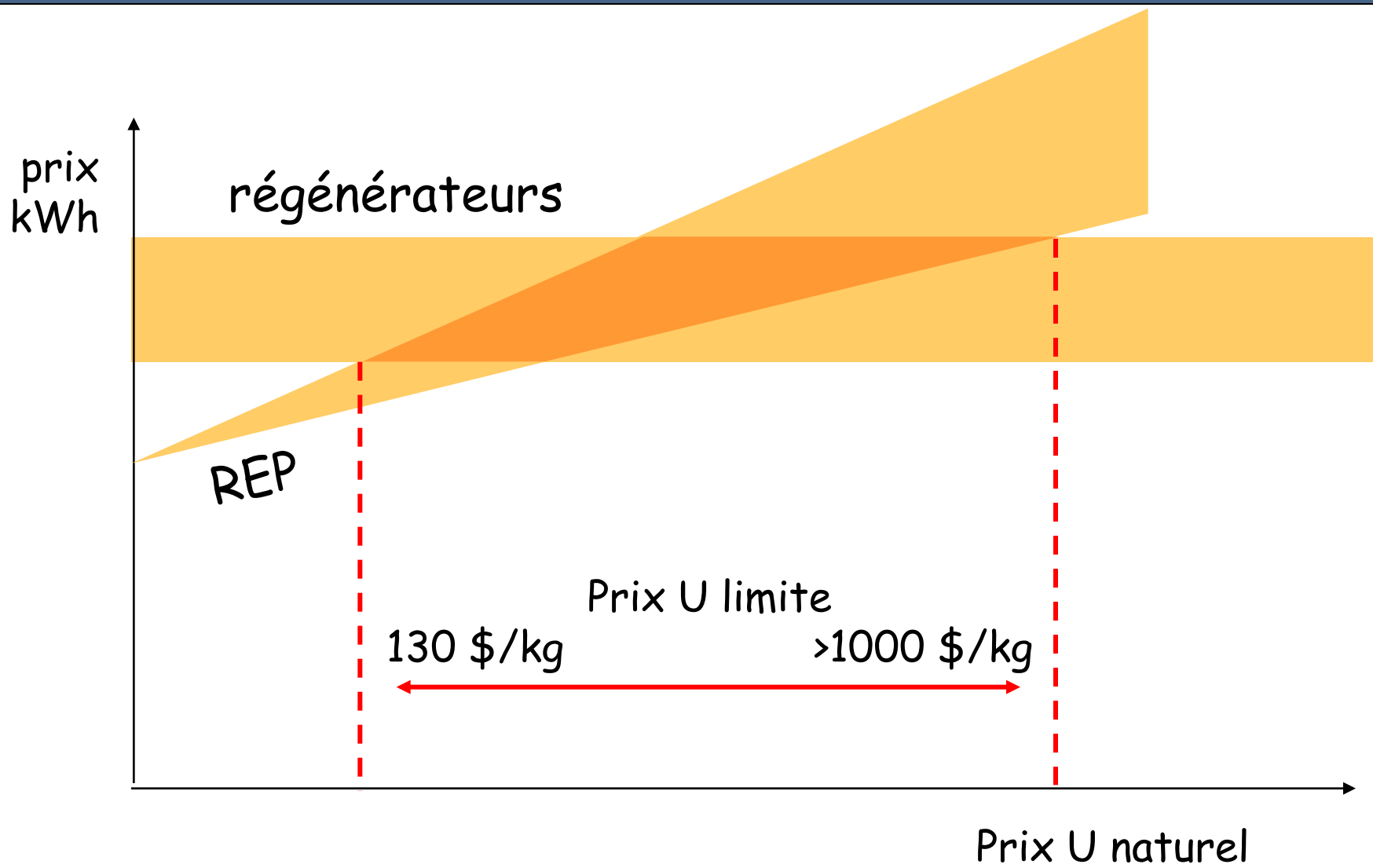
Cycle thorium possible



À un moment donné, les régénérateurs deviennent compétitifs



Mais avec les incertitudes...



Nucléaire du futur

Production nucléaire mondiale	285 GWe (éq. pleine puissance)
Consommation mondiale d'U nat	60000 t/an
Réserves U (RRA+RSE+spéculatives)	10-23 millions of tons
Potentiel de production	
- au taux actuel (et utilisation actuelle de U)	200 – 400 years
- scénario « nucléaire x 10 » et optimisation de l'utilisation de l'U nat en REP	≈ 40 – 80 years

- Le passage à la régénération avant 2050 n'a de sens (du point de vue des réserves) que si le nucléaire se développe massivement d'ici là (facteur 5 à 10)
- Si le nucléaire se développe peu, on devrait continuer avec la filière à uranium enrichi, sauf si d'autres paramètres entrent en jeu : minimisation Pu et déchets par exemple

attention à cette vision « naïve » d'une séquence Gen3 puis Gen4

Potentiel des filières actuelles

Distinguer « ressources » et la capacité industrielle à les mettre à disposition

Il se peut que la production annuelle d'U naturel soit un paramètre plus limitant que les ressources exploitables

Aujourd'hui

production annuelle d'U naturel 45000 tonnes
9 mines seulement ont une capacité > 1000 t /an
pour 50% de la capacité d'extraction (26000 t/an)
Cigar Lake

- mise en service prévue 2007, reportée 2011, 2013?
- 550000 t U_3O_8

2050

IIASA « bas » et « haut » : 216000 t/an à 336000 t/an

Même si les ressources sont là, il est probable de voir apparaître des tensions fortes sur l'Uranium naturel

Mine	Production 2005 (t/an)
Mac Arthur River	7 200
Ranger	4 589
Olympic Dam	3 388
Krasnokamensk	3 037
Rossing	2 583
Arlit	1 750
Rabbit Lake	1 544
Akouta	1 403
Akdala	1 000

Réf M. Delpech, CEA/DEN

⇒ co-existence des systèmes de 3^{ème} et 4^{ème} génération

Principe de la régénération

Régénération : chaque noyau fissile qui disparaît est régénéré



La masse de matière fissile est constante, seule la masse de matière fertile (mineral) diminue (1 tonne par an pour 1 réacteur de 1GWe contre 200 actuellement)

La régénération consomme des neutrons

Pour une fission



ν

neutrons sont produits



1

neutron induit la fission

α

neutrons capturés = $\sigma^{\text{cap}} / \sigma^{\text{fis}}$ du noyau fissile

$1 + \alpha$

neutrons capturés sur le fertile pour régénérer le fissile

$$\nu - 2 (1 + \alpha)$$

$$> 0$$

$\Rightarrow$ régénération possible

$$< 0$$

$\Rightarrow$ régénération impossible

Principe de la régénération

Le nombre de neutrons disponibles Nd ne dépend que des propriétés du noyau fissile

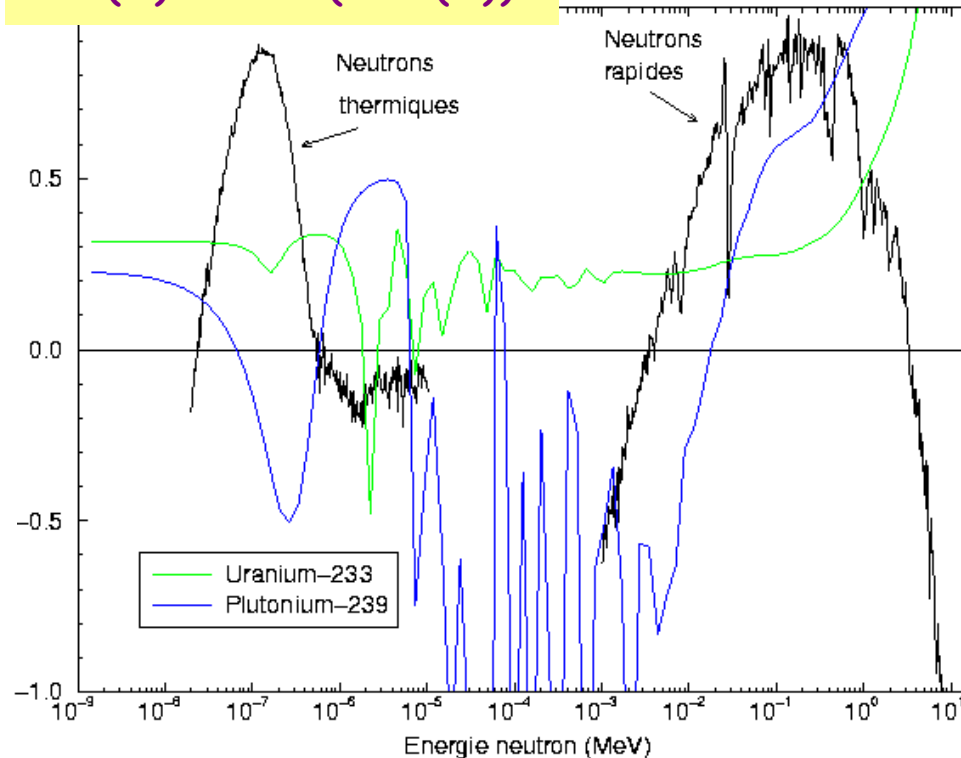
$$\alpha = \frac{\sigma_{\text{capture fissile}}}{\sigma_{\text{fission fissile}}}$$

$$Nd(E) = \nu - 2(1 + \alpha(E))$$

Spectre thermique

Th/U Nd > 0

U/Pu Nd < 0



Spectre rapide

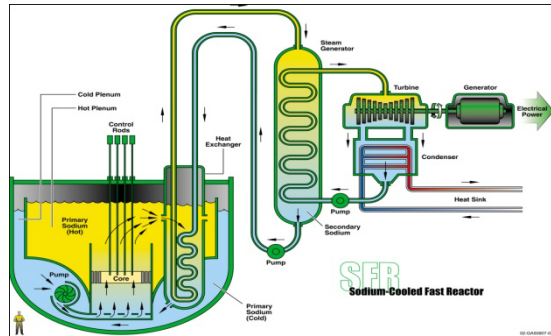
Th/U Nd > 0

U/Pu Nd > 0

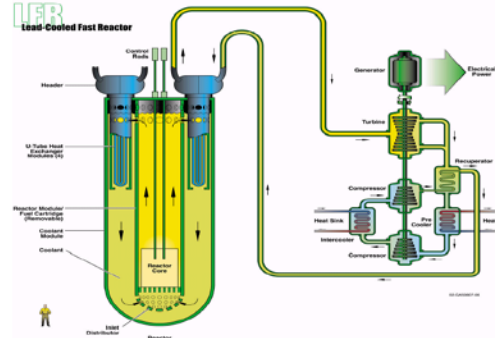
Le cycle Uranium nécessite des neutrons rapides pour atteindre la régénération

Technologie des régénérateurs (Gen4)

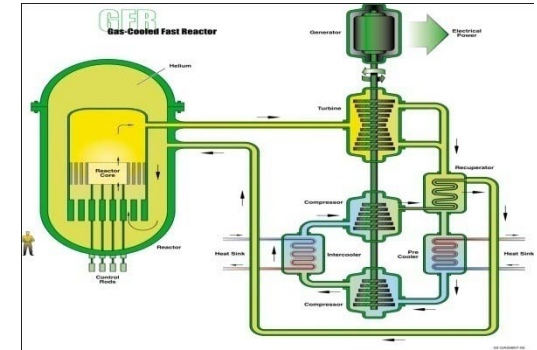
Na



Pb



He

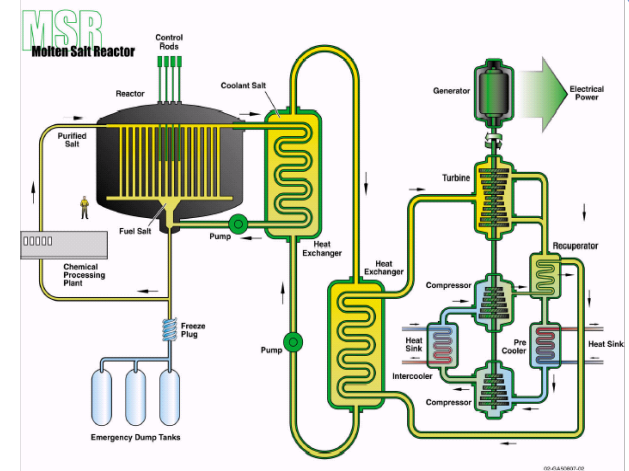


Neutrons rapides nécessaires pour obtenir la régénération

RNR Sodium : technologie la plus aboutie et la plus à même d'être déployée d'ici 2050

Difficultés majeures :

- coefficient de vide positif
- réactivité chimique du sodium
- « industrialisation » / coût de la technologie



RNR-Na : une innovation importante

ASTRID Prototype RNR-Na 600 MWe horizon 2020-2025

- Cœur innovant démonstrateur des options technologiques et des performances d'une filière industrielle

- Sureté
- Compétitivité
- Capacité à la surgénération

- Capacité à transmuter les actinides mineurs

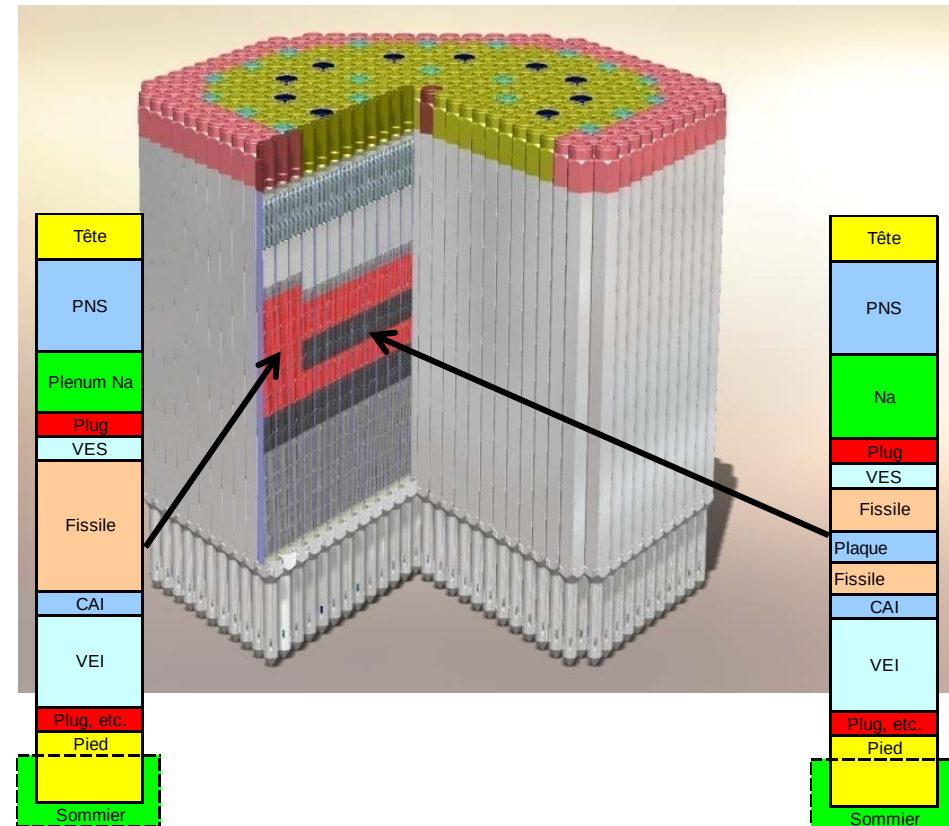
- Irradiations expérimentales

Cœur à faible Vidange

Réelle innovation, véritable valeur ajoutée de ASTRID par rapport à Superphénix , EFR, ou SFR-V2

Etudes à poursuivre

*Après Fukushima, décidera-t-on
« comme prévu » de construire un
prototype Sodium en 2012?*



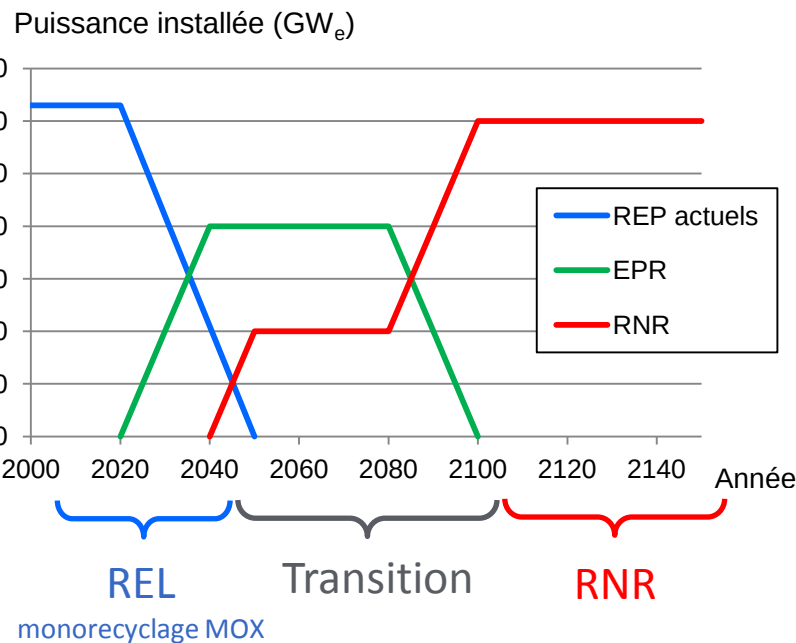
RNR-Na : la question de l'inventaire Pu

Superphénix 12 tonnes de Pu en cycle par GWe

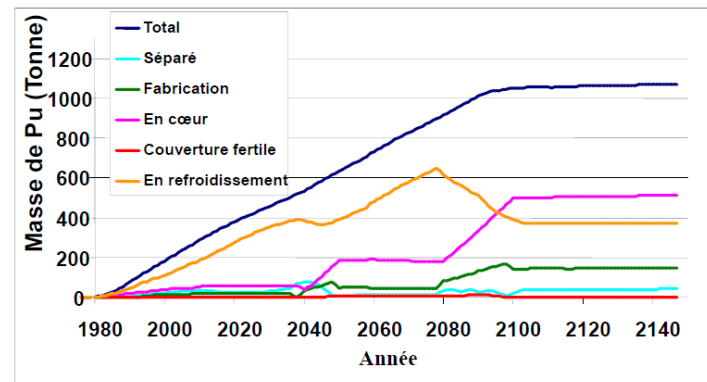
SFR-V2 (2007) ~ 17-20 t/GWe

SFR-CFV ~ 17-20 t/GWe

~1000 tonnes de Pu à l'équilibre
dans le parc français de 60 GWe



SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE INVENTAIRE PLUTONIUM



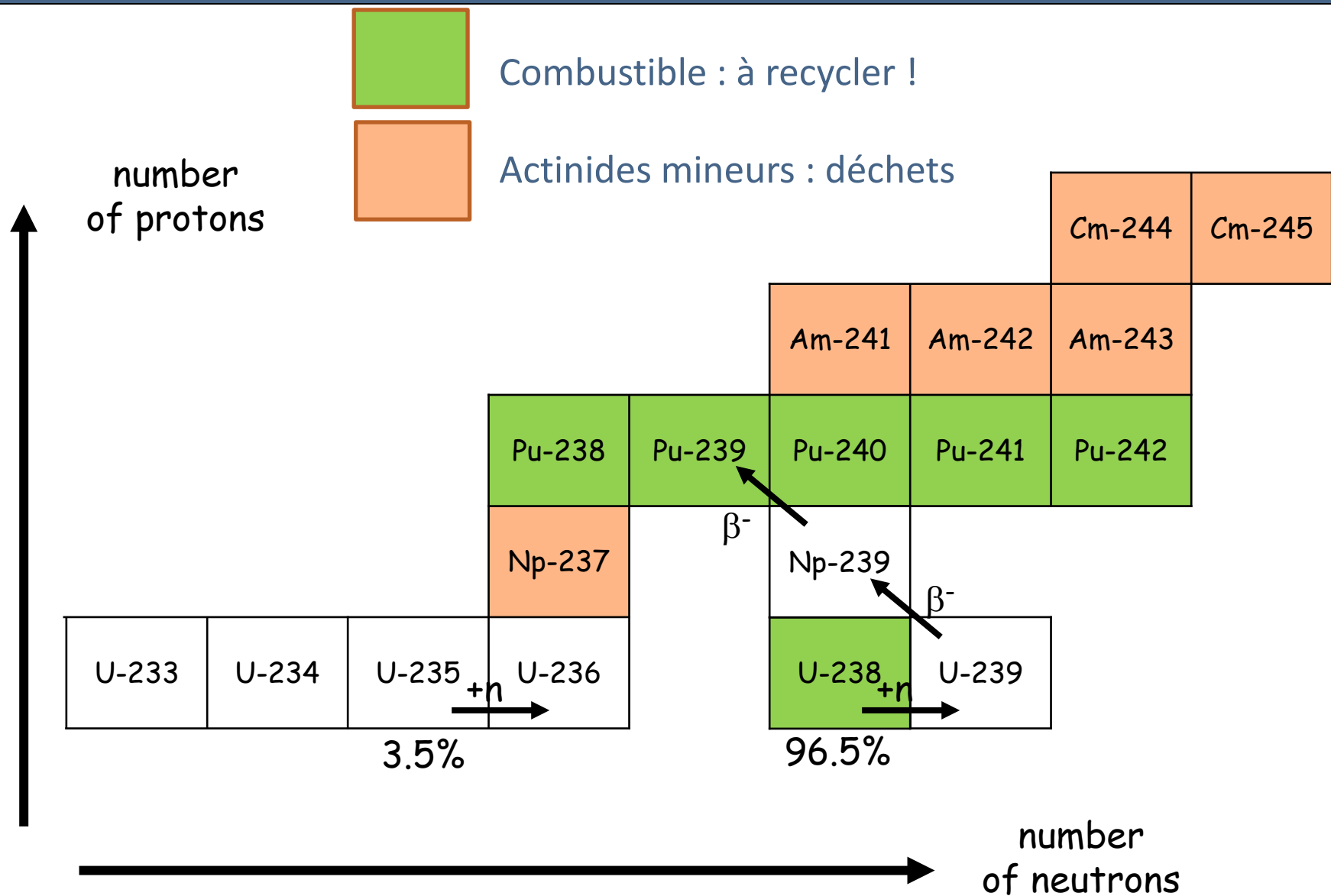
Inventaire Pu total ~1050 tonnes à l'équilibre,
avec une teneur Pu de 16.5% assurant l'iso-génération

⁷
Audition CNE du 5 janvier 2011 : Cycle des matières pour Astrid



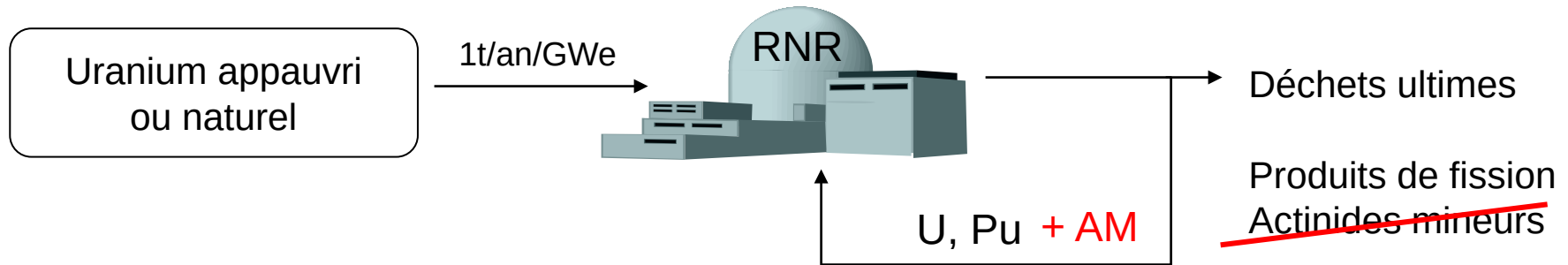
Une vitesse de déploiement limitée par la disponibilité du Pu

Dans ce type de scénarios, le Pu d'aujourd'hui ne peut être considéré comme un déchet
(2010 : <300 tonnes de Pu dans les UOX et MOX usés)



RNR-Na : Transmutation des actinides mineurs

Les réacteurs rapides sont capables de recycler les actinides mineurs
Différentes stratégies



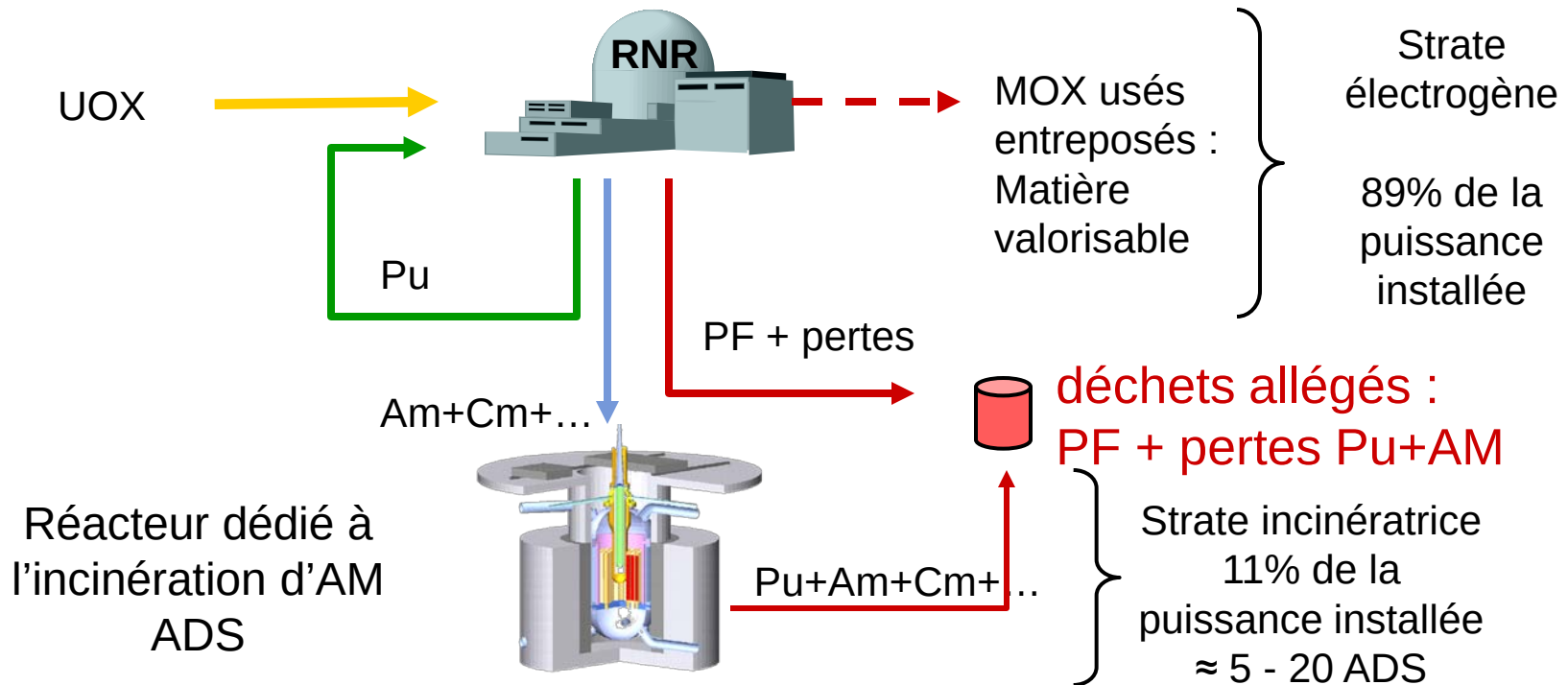
recyclage homogène : U, Pu, Np, Am, Cm recyclés ensemble, tout le cycle est affecté par la présence des AM

- recyclage hétérogène : AM recyclés en couverture fertile (20 à 40% AM), une partie du cycle est affecté par les AM
- double strate : les AM sont transmutés dans des réacteurs dédiés (ADS) : découplage production d'électricité / transmutation AM

- Transmutation des actinides mineurs

⇒ Recyclage U+Pu+AM, déchets ultimes minimisés

Une variante supplémentaire : la stratégie de double strate



Combustible concentré en Actinides mineurs

- Mauvaise qualité neutronique (très peu de neutrons retardés, coefficients de température et vide positifs)
- Pilotage d'un réacteur critique jugé trop difficile
- Sous-criticité requise, besoin d'une source externe de neutrons

Rendez-vous 2012 : orientations sur la transmutation

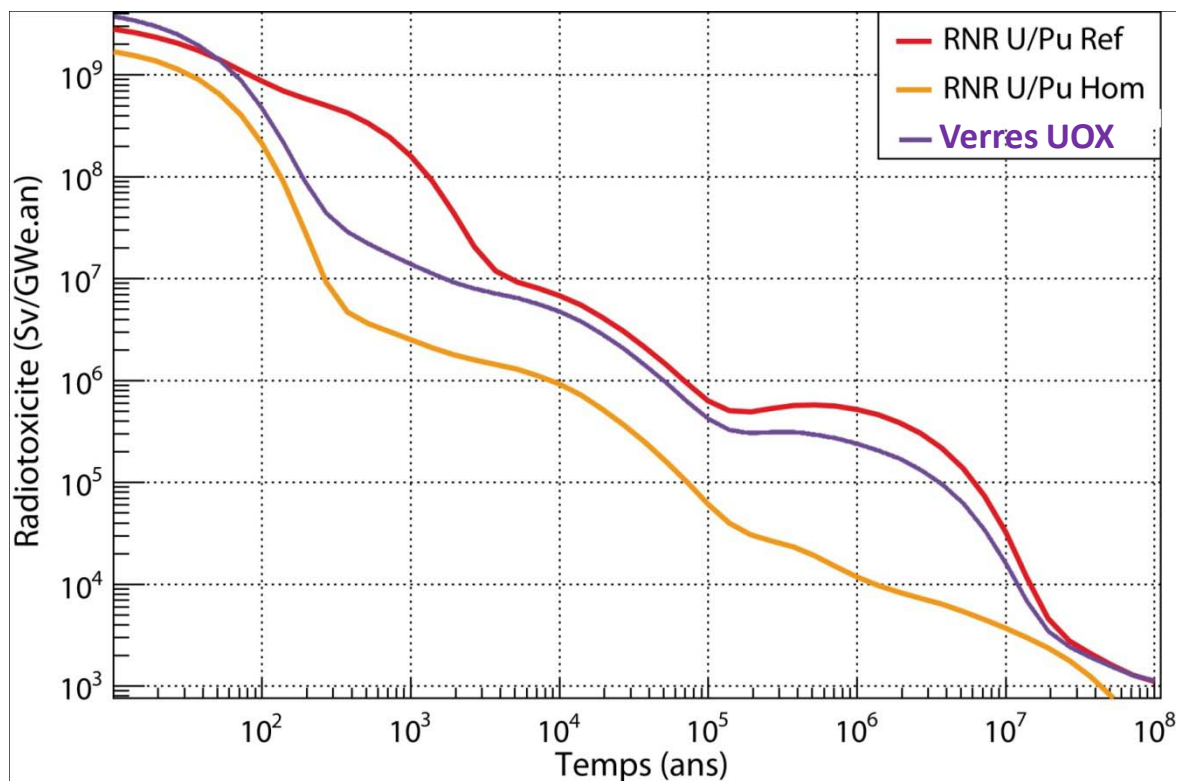
Astrid : prototype RNR-Na France

MYRHA : prototype ADS (Belgique, Europe)

Transmutation : impact sur les déchets

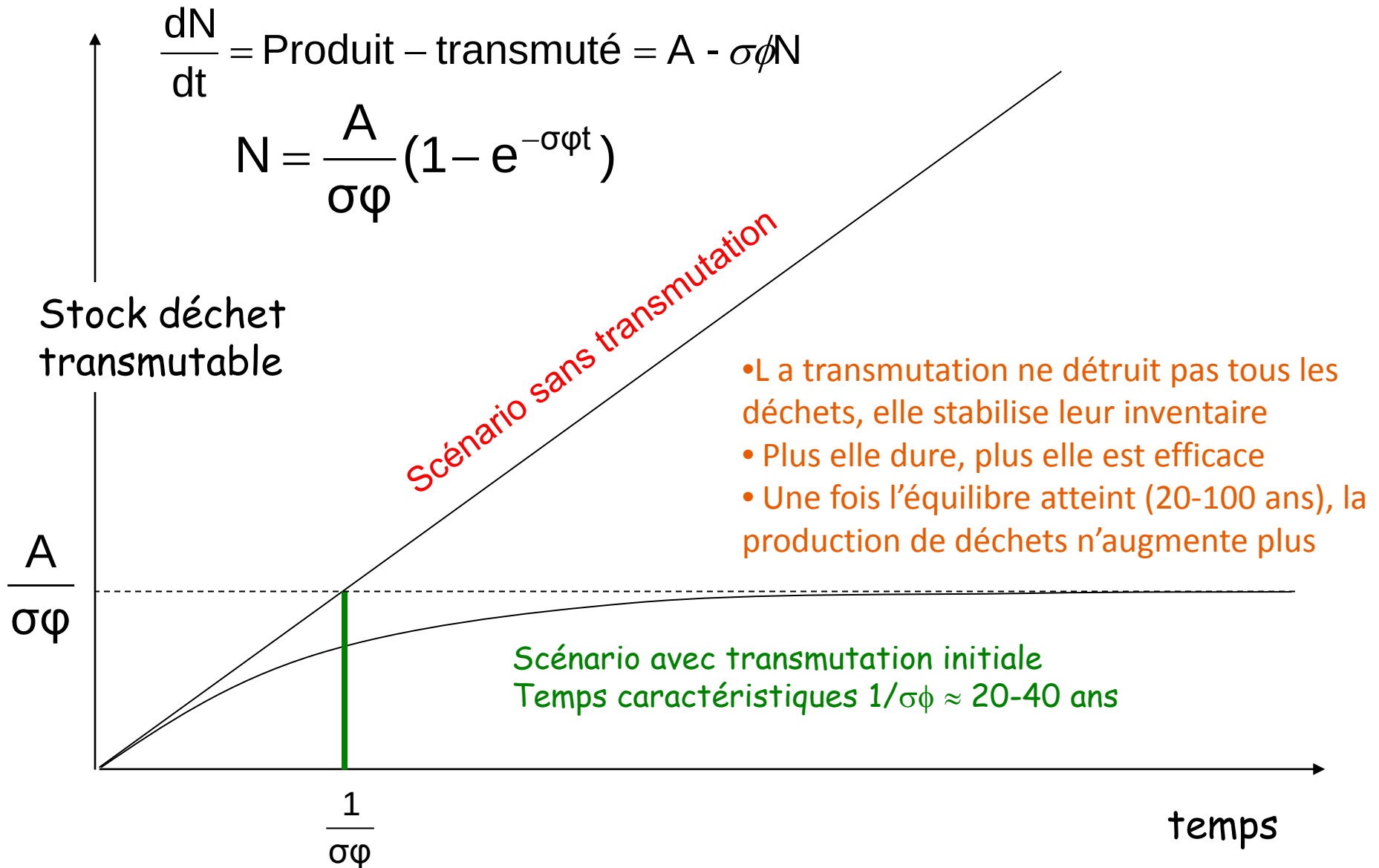
Sans transmutation, les verres issus des RNR-Na sont plus radiotoxiques que ceux issus du traitement des UOX

La transmutation permet de réduire la charge radiotoxique et thermique de façon significative

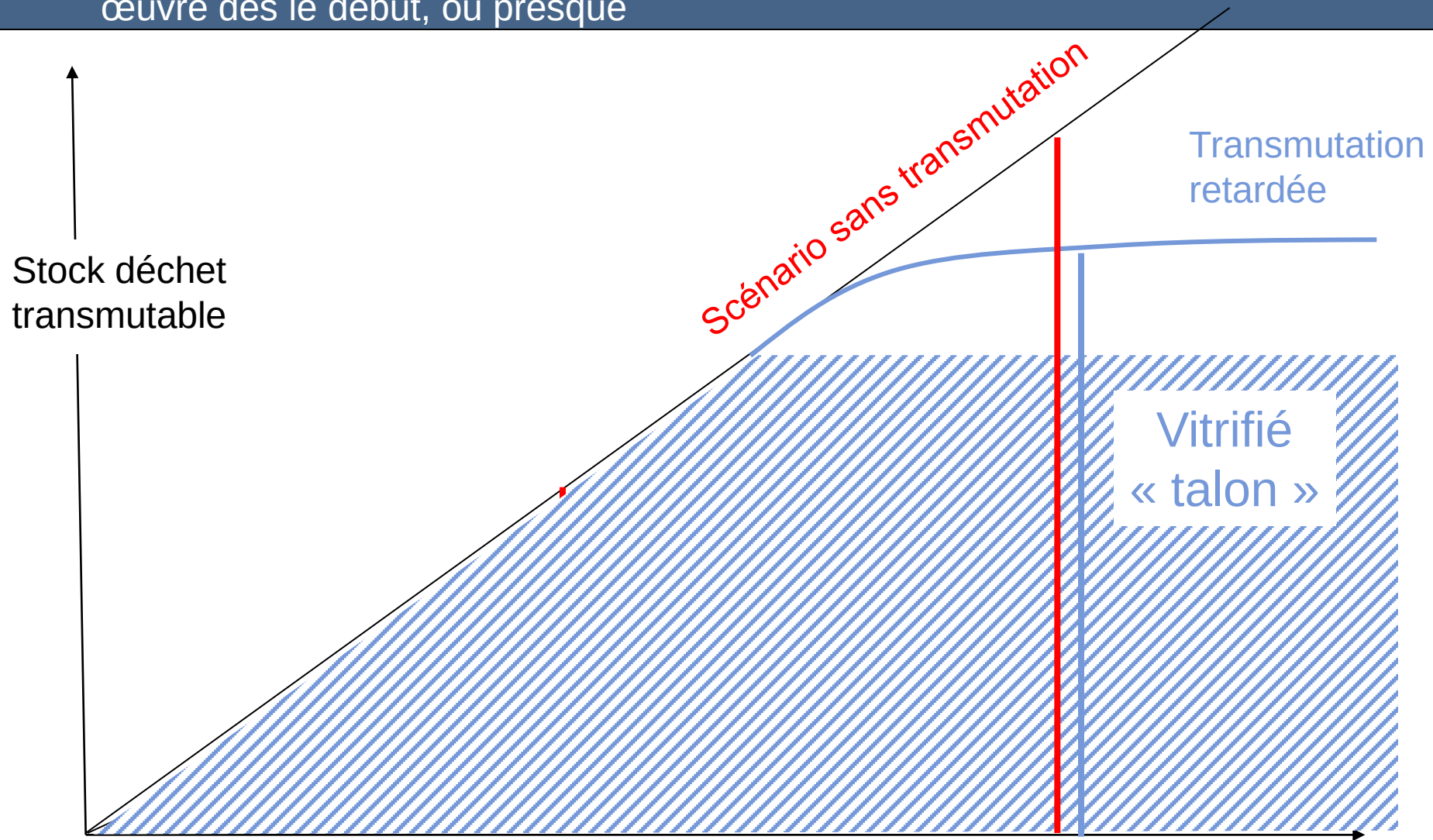


Radiotoxicité par ingestion : radioactivité pondérée par le « risque » associé à l'ingestion d'un radionucléaire donné (type de particule, énergie, localisation, temps de séjour, ...)

Transmutation des actinides mineurs



La transmutation n'a de sens que si elle est mise en œuvre dès le début, ou presque



Transmutation : impact sur le cycle

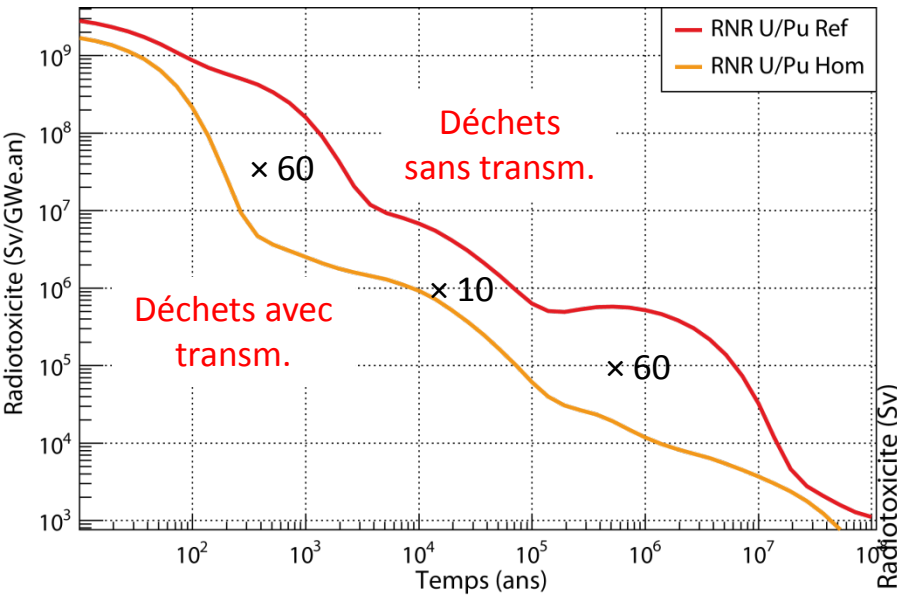
- Recyclage de tous les actinides possible grâce aux neutrons rapides
- Impact traitement et fabrication important mais jugé non rédhibitoire
- Inventaire Cf à l'équilibre 35 mg/GWe
- Inventaires AM à l'équilibre
Am : 32 tonnes
Cm : 8 tonne
à relativiser avec les 1000 tonnes de Pu

	MOX (réf.)	Recyclage Pu+AM en REP	RNR Multi Pu	RNR Multi Pu+AM
Au traitement				
Puissance résiduelle (W/g/tML)	1	x 2	x 1	x 2
Source neutron (n/s/tML)	1	x 130	x 1	x 2
À la fabrication				
Puissance résiduelle (W/g/tML)	1	x 3	x 0,5	x 2,5
Source neutron (n/s/tML)	1	x 8000	x 1	x 150
t/an	820	820	340	340

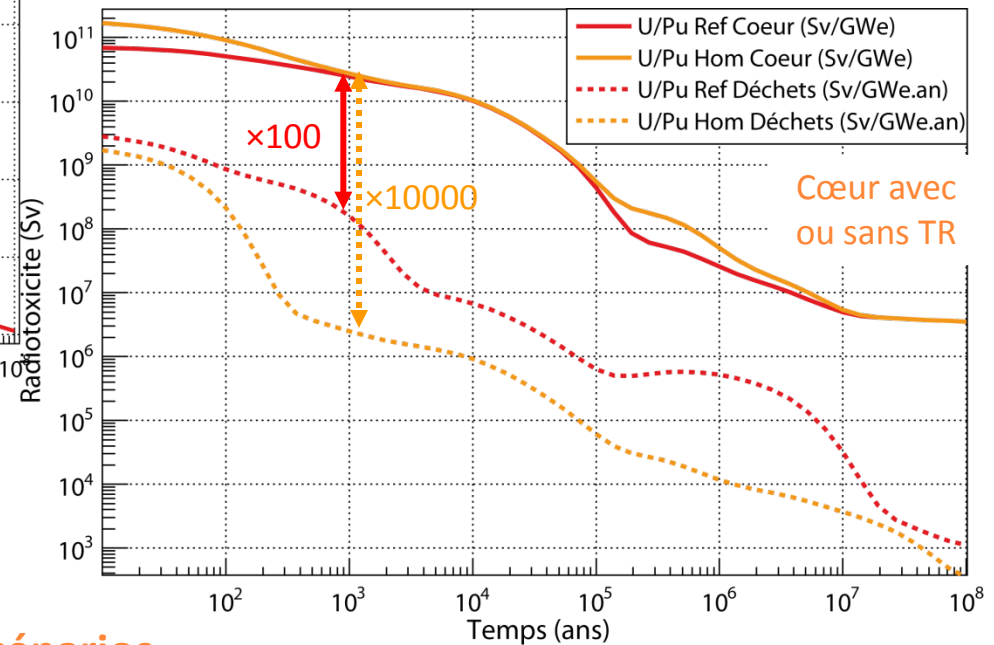
→
rédhibitoire

RNR-Na cycles U/Pu

Recycler les actinides mineurs (Am, Cm, ...) permet de réduire la radiotoxicité des déchets ultimes



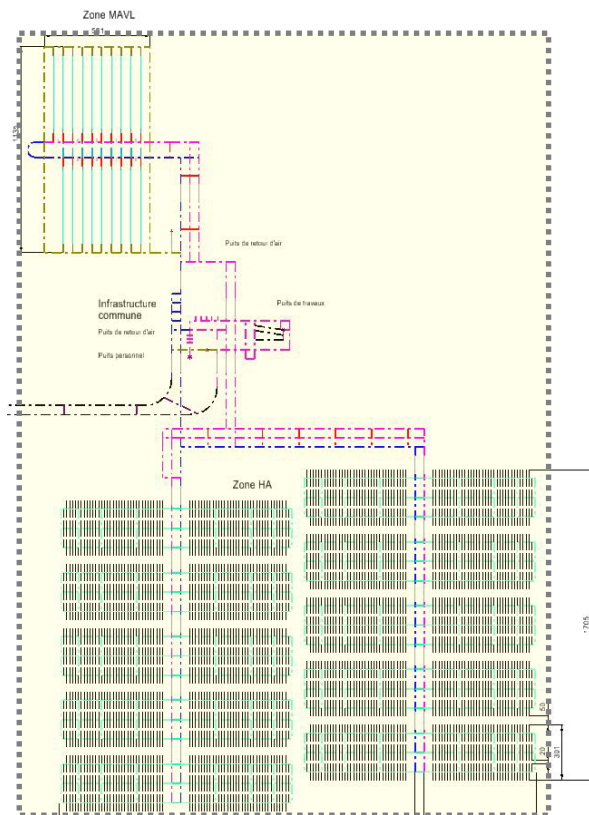
Mais la radiotoxicité du cœur (déchet à l'arrêt de la filière) domine les déchets cumulés pendant les siècles précédents (Pu !)



Prendre en compte la fin de jeu dans les scénarios
Rechercher des concepts à faibles inventaires de matière fissile

Transmutation : impact sur le stockage

Sans transmutation (70 ans)

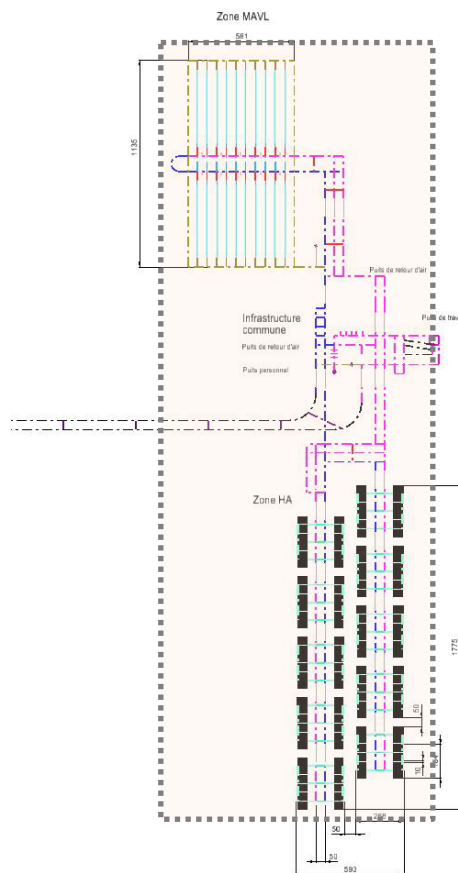


Zone HA : 510 ha (1)

Total stockage : 1200 ha (1)

Vol. excavé : 4,6 Mm³ (1)

Transmutation AM (120 ans)



Zone HA : 110 ha (/ 4.6)

Total stockage : 470 ha (/ 2.5)

Vol. excavé : 3,0 Mm³ (/ 1.5)

Impact important sur la surface de stockage HAVL, moyennant une augmentation de la durée d'entreposage
Jusqu'à un facteur 10 pour la zone des déchets les plus radioactifs

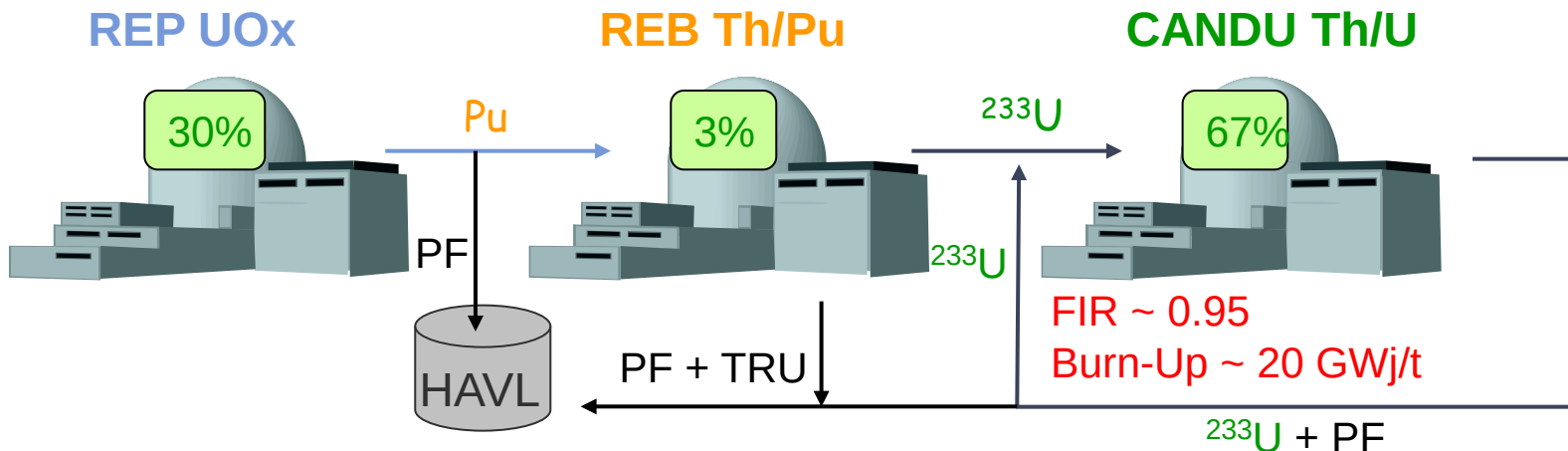
Effet rebond : un site de stockage pourra accueillir plus d'années de production, et donc plus de produits de fission, qui dominent la dose à l'exutoire après 100000 ans...

Quelques mots sur le cycle thorium

Régénération théoriquement possible en spectre thermique

Mais le réacteur s'empoisonne rapidement, les produits de fission capturent des neutrons, ce qui dégradent le bilan neutronique. Le réacteur devient sous générateur au bout de quelques mois.

Néanmoins, on peut économiser des ressources avec le cycle thorium en réacteur à eau



Dans ce scénario mixte, on réduit de 70% les REP Uox, et on réduit la consommation d'uranium de 70% sans RNR

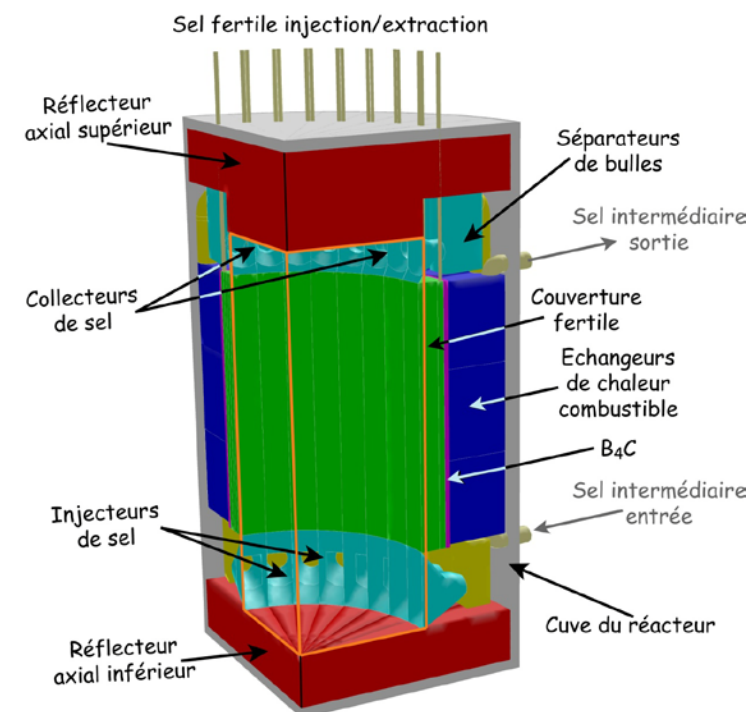
Stratégie alternative au déploiement rapide de RNR

Cycle thorium : Le MSFR de référence

Réacteur à sels fondus

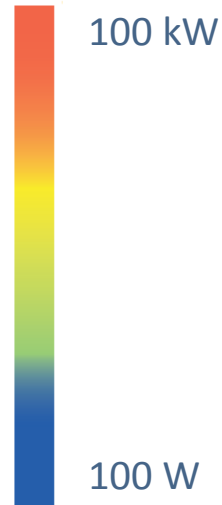
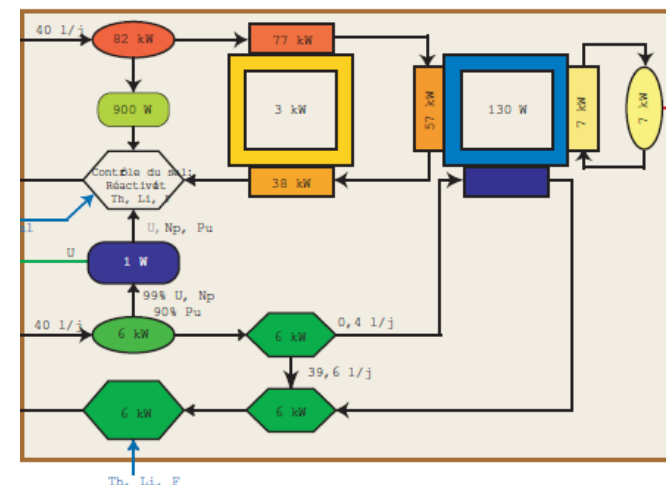
Combustible liquide = caloporteur

Peut être retraité en ligne pour en extraire les produits de fission et optimiser la régénération du cycle thorium



- Sel initial: 77,5%⁷LiF, 20%ThF₄, 2,5%²³³UF₄
- Température de fonctionnement: 650 à 750 °C
- Puissance: 3 GW_{th} (1,5 GWe)
- Inventaire initial d'²³³U par réacteur: 5060 kg
- Volume de sel: 18 m³
 - 1/2 dans le cœur et plenums
 - 1/2 dans les échangeurs et tuyaux
- Retraitement du cœur: 40 l/j

Usine chimique associée



CNRS/IN2P3/LPSC Grenoble

En conclusion

Fukushima a montré qu'un accident « hors dimensionnement » pouvait se produire

Challenge pour le nucléaire : passer d'une « sûreté d'évènement » à une « sûreté d'état »

- Principe : considérer qu'un accident grave se passe, quel qu'en soit la cause, et dimensionner le système pour pouvoir le gérer
- Le récupérateur de corium (EPR) ou les recombineurs H₂ (EPR, REP) en sont un exemple, mais ce principe doit se généraliser

Impact possible de Fukushima

- retarder ou annuler la reprise du nucléaire ?
- accélérer la fermeture des vieilles centrales au profit de nouvelles ?
- interdiction de construire de centrale de génération 2, comme cela était prévu avant Fukushima par la France (mais hors de la France...) ?

Il n'en reste pas moins que l'énergie nucléaire pourrait néanmoins jouer un rôle majeur

- demande d'énergie croissante
- lutte contre les émissions de gaz à effet de serre

En conclusion

Les RNR-Na sont sans aucun doute la technologie régénératrice la plus aboutie, mais sera-t-elle industrialisable au niveau de plusieurs centaines de réacteurs ? Surtout après Fukushima...

Le statut du plutonium dépend du futur « lointain », si le nucléaire stagne, il devient de très loin le déchet principal.

L'inventaire en plutonium reste très important, surtout dans les derniers concepts

- peut limiter le déploiement rapide de la filière RNR-Na
- domine largement la radiotoxicité des déchets produits, même sans transmutation

La transmutation des actinides mineurs, difficile à décider tant qu'on ne sait pas ce qu'on fait du Pu, et quand le saurons-nous?

- réduction significative de la radiotoxicité à long terme des déchets et de l'emprise du stockage
- impact sur le cycle « à payer »

Des alternatives, encore au stade de l'étude amont

- cycle thorium en réacteurs à eau
- réacteurs à sels fondus

Physique

Simulation des réacteurs
et
Scénarios associés

Accélérateurs pour les
réacteurs hybrides dédiés à la
transmutation des déchets

Données nucléaires
mesures – physique
fondamentale

Radio-chimie

Combustibles
nucléaires
Solides et liquides (sels
fondus)

Transfert des radionucléides
dans la biosphère

Développement de
couches minces
pour les cibles

Energie non
nucléaire

TACSOL
Production de froid
solaire par voie thermo-
accoustique

Chart

Map



How to use



Share graph



Full screen

lin

CO2 emissions (tonnes per person)

CDIAC (Carbon Dioxide Information Analysis Center)

United States 1960

France 1960

China 1971

<http://www.gapminder.org/>



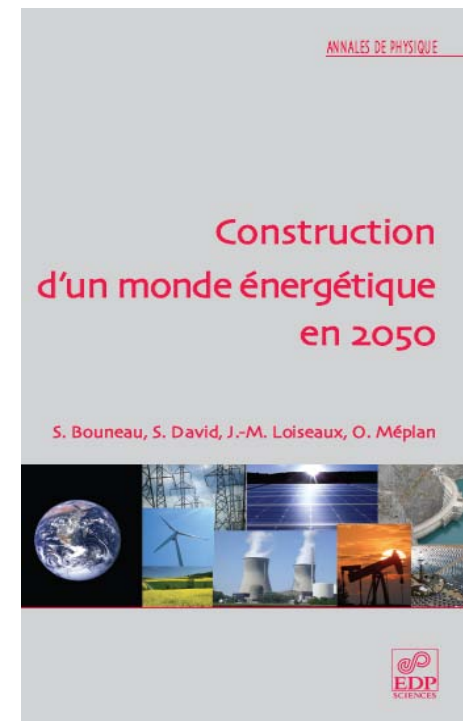
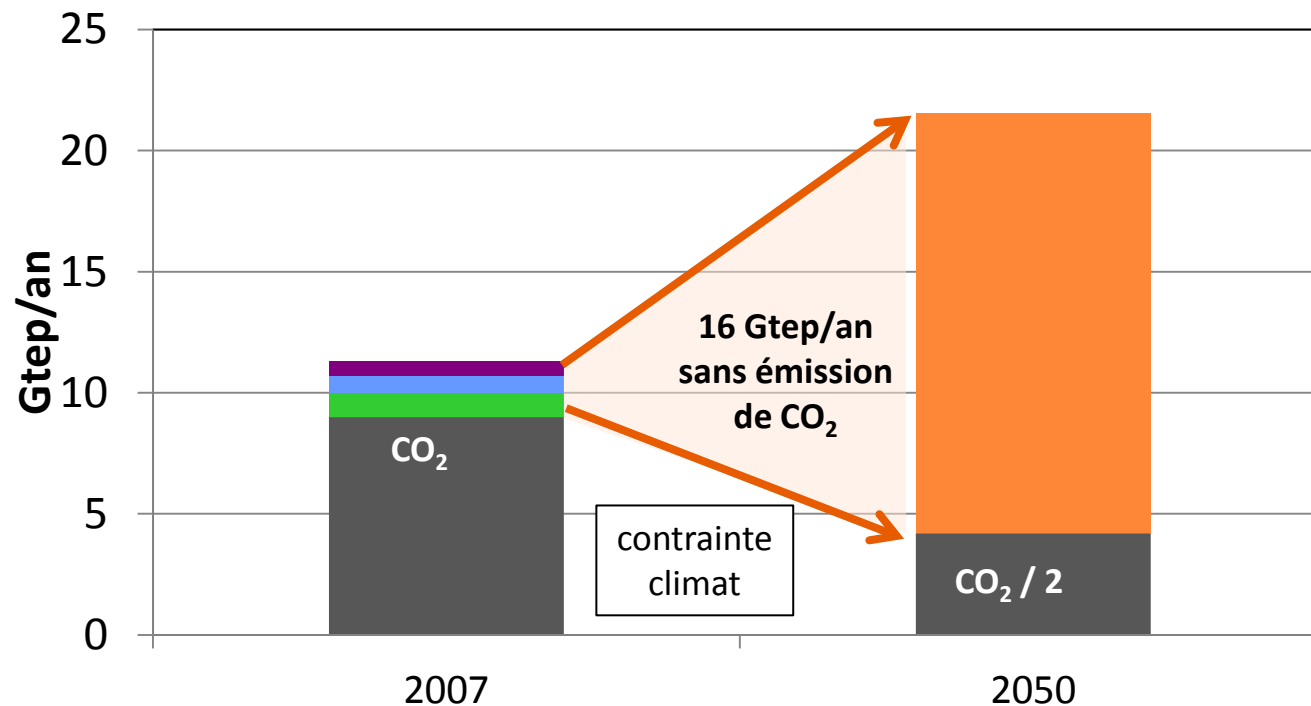
Energy use, per person (tep/an/han)

lin

But de l'étude

décrire ce que pourrait être un monde « 20 Gtep/an » avec contrainte climatique

- construction « transparente », donc discutable
- contraintes explicitées
 - consommation mondiale 2050 20 Gtep/an
 - réduction d'un facteur 2 des émissions de gaz à effet de serre
 - réduction des inégalités de consommation
 - adéquation des sources et des besoins



Répartition de la consommation d'énergie dans le monde

Principe

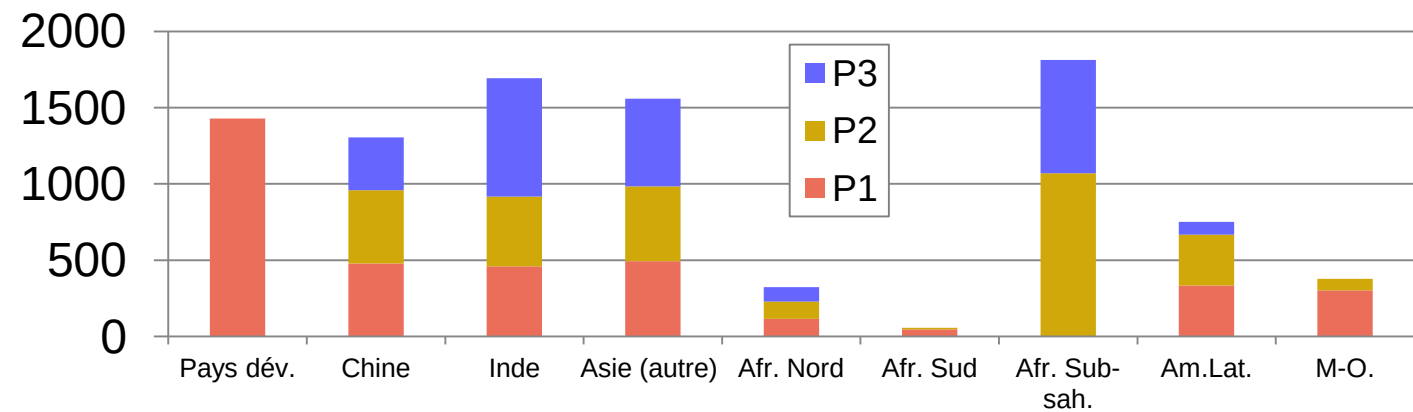
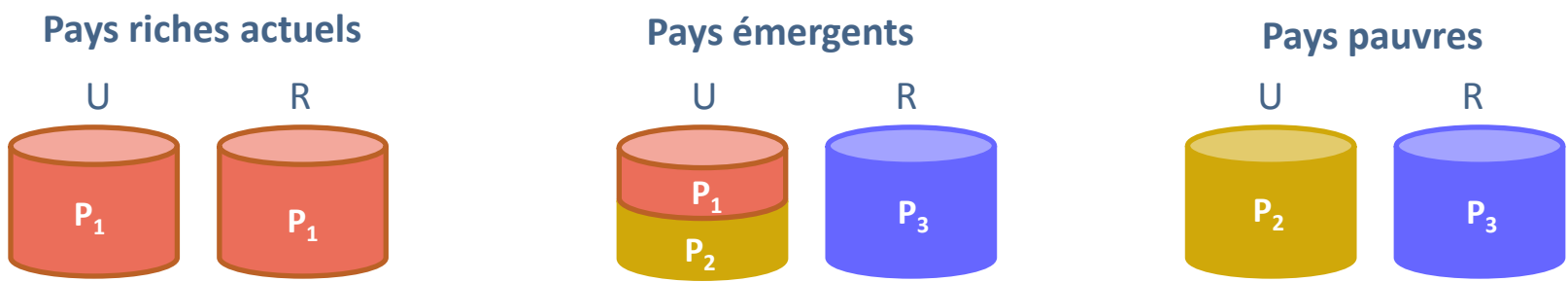
Données population 2050 : ONU

3 types de populations P_1 P_2 P_3

niveau de consommation élevé, moyen, faible $C_1 > C_2 > C_3$

Chaque grande région du monde possède en son sein ces 3 types de population

Choix de la répartition basé sur le taux d'urbanisation



Pop 2050 (Ghab)

Total	9,3
P1	3.7
P2	3.0
P3	2.6

Répartition de la consommation d'énergie dans le monde

Choix des inégalités de consommation

Actuellement, il y a plus d'un facteur 10 entre les consommations des populations les plus riches et des plus pauvres

Choix d'inégalité 2050 $C_1/C_3 = 4$; $C_2/C_3 = 2$; $C_3/C_3 = 1$

Règle de somme $C_1P_1 + C_2P_2 + C_3P_3 = 20$ (Gtep/an)

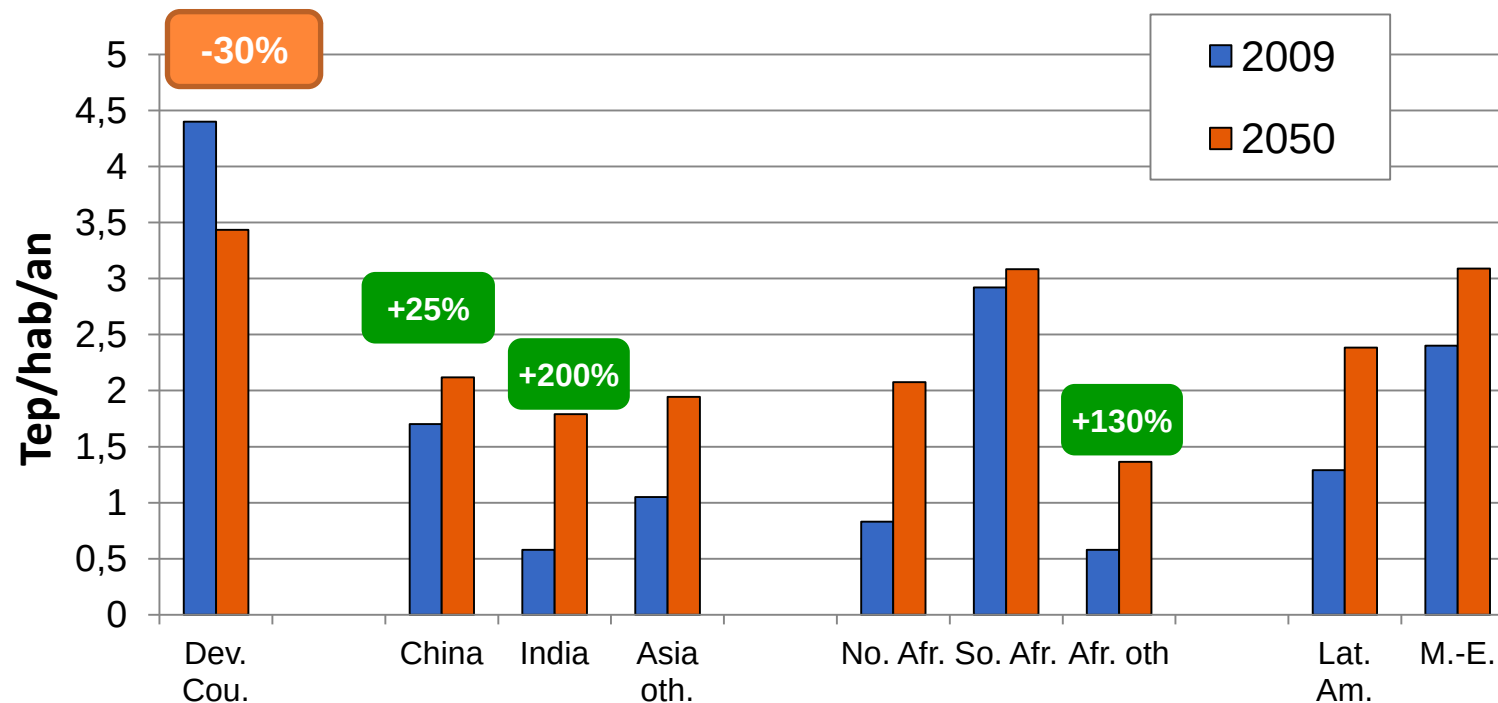
On obtient $4P_3 + 2P_3 + P_3 = 20$ (Gtep/an)

Et finalement $C_1 = 3,43$ $C_2 = 1,72$ $C_3 = 0,86$ (tep/hab/an)

1 tep = 42 GJ

Convention choisie pour l'électricité 1 MWh = 0,22 tep

Répartition de la consommation d'énergie dans le monde



Un scénario « 20 Gtep/an »

- Efforts des pays riches : réduction incompatible avec une croissance économique à +2%/an
- Une consommation dans les pays émergents encore 40% plus faible que dans les pays riches
- Une consommation en Afrique sub-saharienne qui n'excède pas 1,4 tep/hab/an en moyenne, et inférieure à 1 tep/hab/an dans les zones rurales

L'acceptabilité sociale d'un scénario 20 Gtep/an se pose

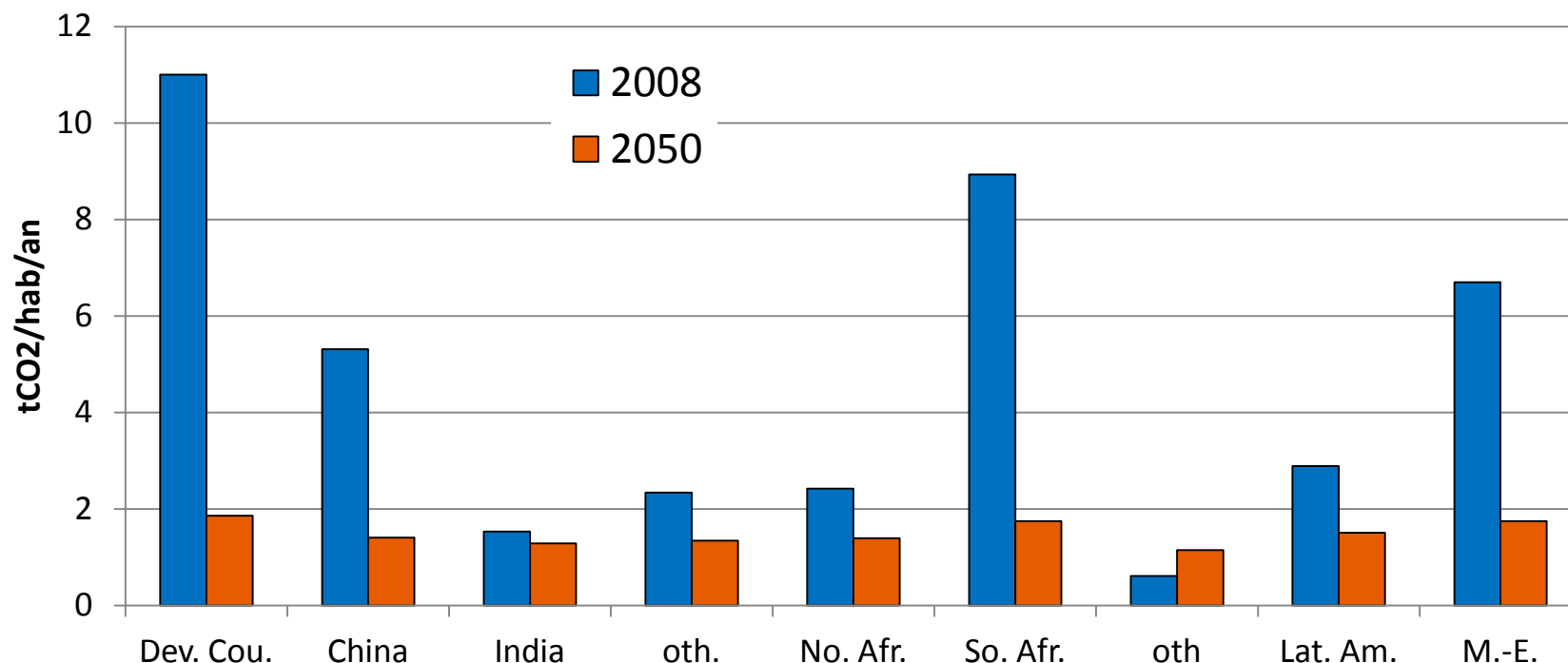
Contrainte climatique

Même construction pour les émissions de gaz à effet de serre F_1 F_2 F_3

Consommation d'énergie avec EGES = 4,2 Gtep/an (division par 2)

Clés d'inégalité 2 / 1,4 / 1 plus drastiques que sur l'énergie

$F_1 = 0,59$ $F_2 = 0,41$ $F_3 = 0,41$ (tep/an/hab)



Principe

- Définition des besoins en transport / chaleur HT / chaleur BT / électricité pour chaque type population P_1 P_2 P_3
- Les fossiles avec émission de GES : dédiés principalement au transport
- Potentiel des énergies renouvelables fixé à un niveau optimiste (WEC, ECF, ...)
- Biomasse : essentiellement utilisée pour les populations rurales (P_3)
- Potentiel de la capture du CO_2 fixé à un niveau (très) optimiste 12 GtCO_2/an
- Energie manquante pour le transport et la chaleur transférée sur l'électricité
- Nucléaire : utilisé pour remplir l'énergie manquante des populations urbaines (production centralisée) de type P_1 et P_2 uniquement

Construction du mix énergétique

Hypothèse : potentiel des sources renouvelables (World Energy Council)

	Hydro	Biomass		Solar			éolien	autres	total
(Gtep/an)		Biofuels	Bois	Therm.	PV	Conc.			
2008	0.7	0.03	0.9	?	0.0003	?	0.05	0.025	1,7
2050	2	0.5	2	0.5	0.5	0.7	1	0.3	7.5
Déploiement	x 3	x 20	x 2		x 2000		x 20		x 4,4
Usages									
Transport		x							
Chaleur HT			x			x		x	
Chaleur BT			x	x		x		x	
Electricité	x		x		x	x	x	x	

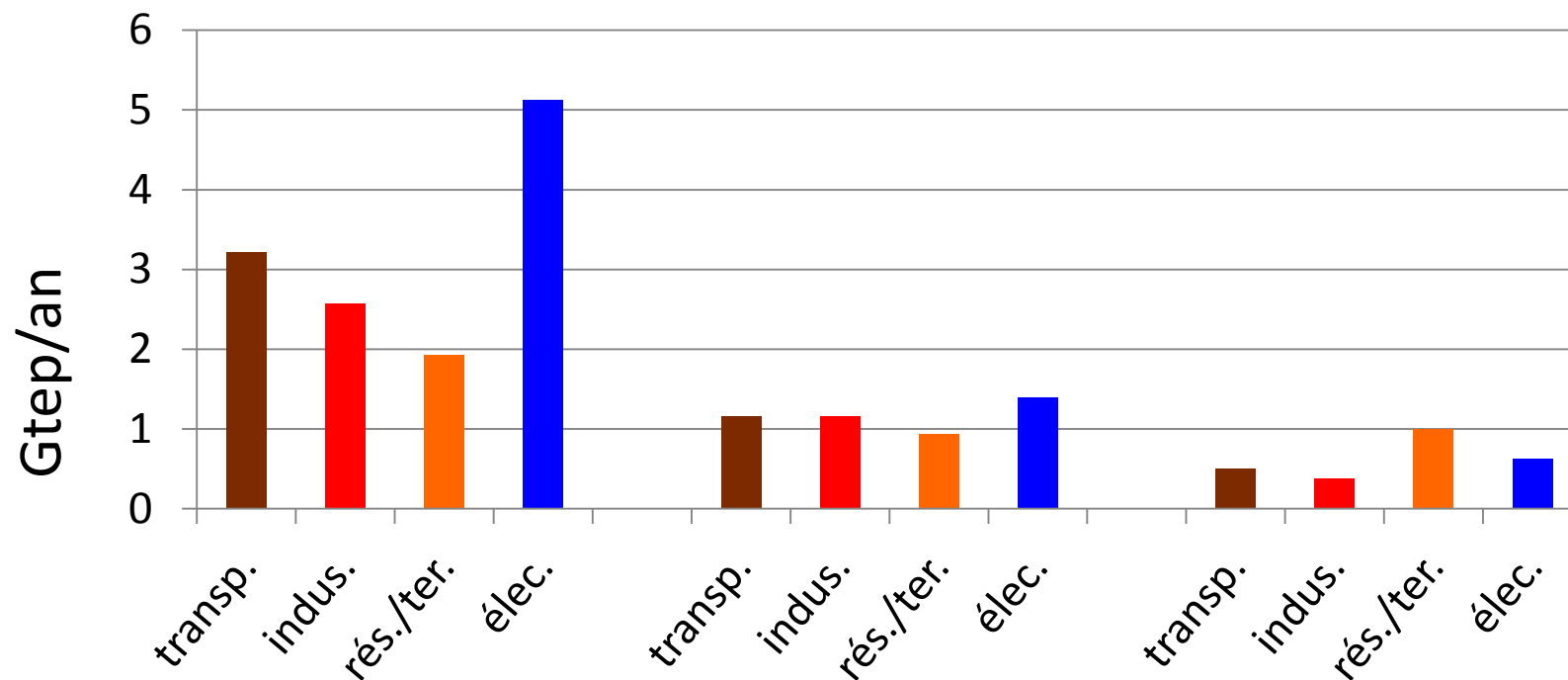
Electricité renouvelable 4 Gtep/an

Chaleur renouvelable 3 Gtep/an

Biocarburants 0,5 Gtep/an

Construction du mix énergétique

Répartition des besoins

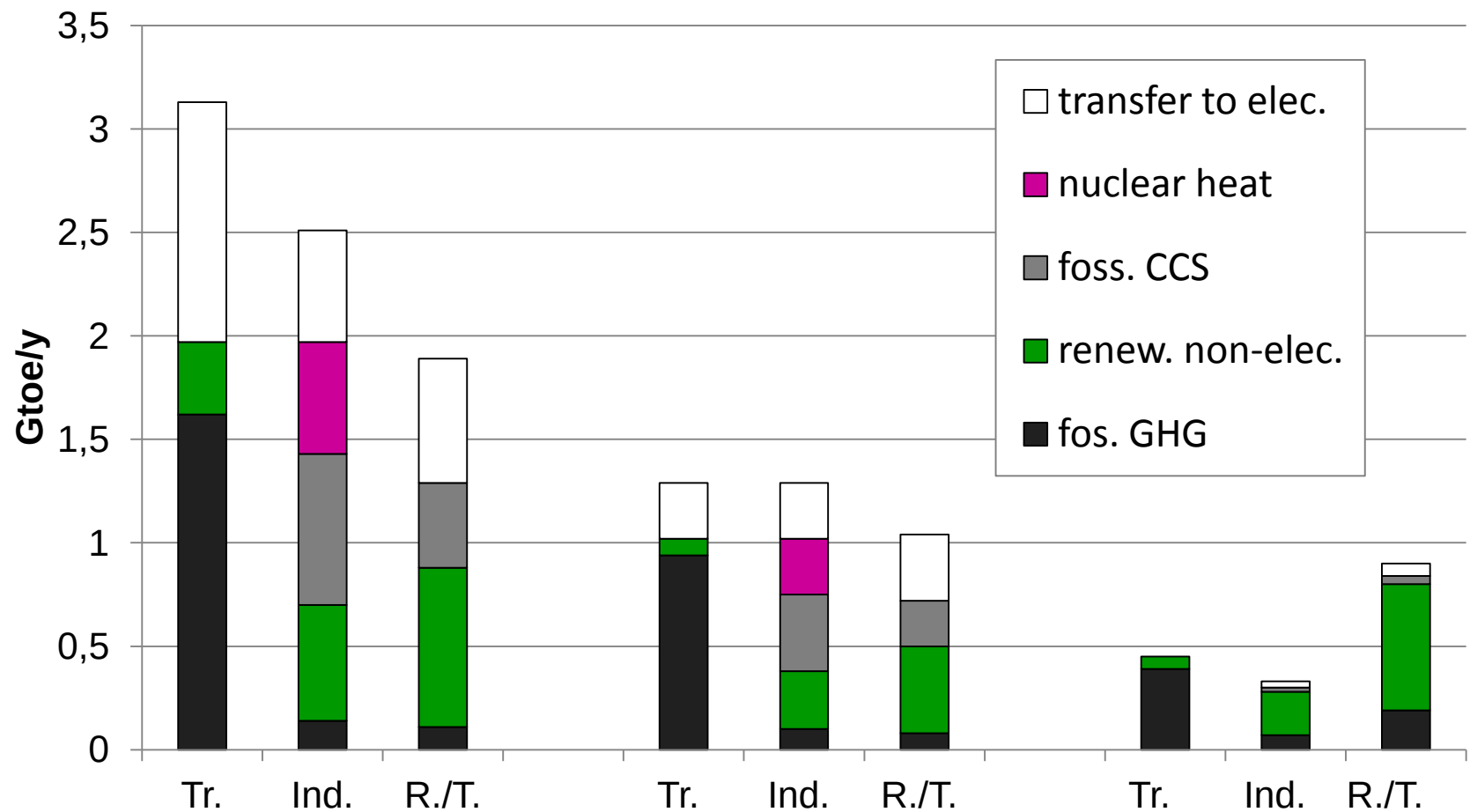


Transport	4,89 Gtep/an
Chaleur HT	4,15 Gtep/an
Chaleur BT	3,82 Gtep/an
Électricité	7,14 Gtep/an

0,5 Gtep/an	Biocarburants
3 Gtep/an	Chaleur renouvelable
4 Gtep/an	Electricité renouvelable

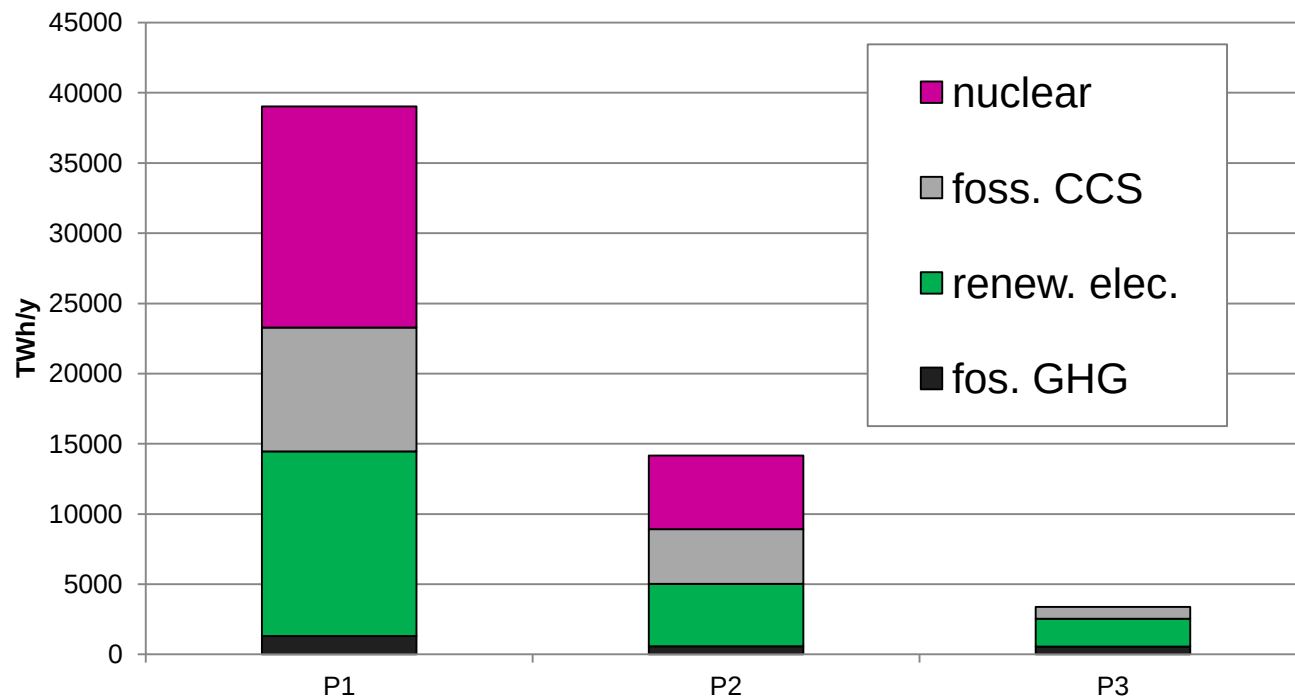
Construction du mix énergétique

« remplissage des besoins » hors électricité

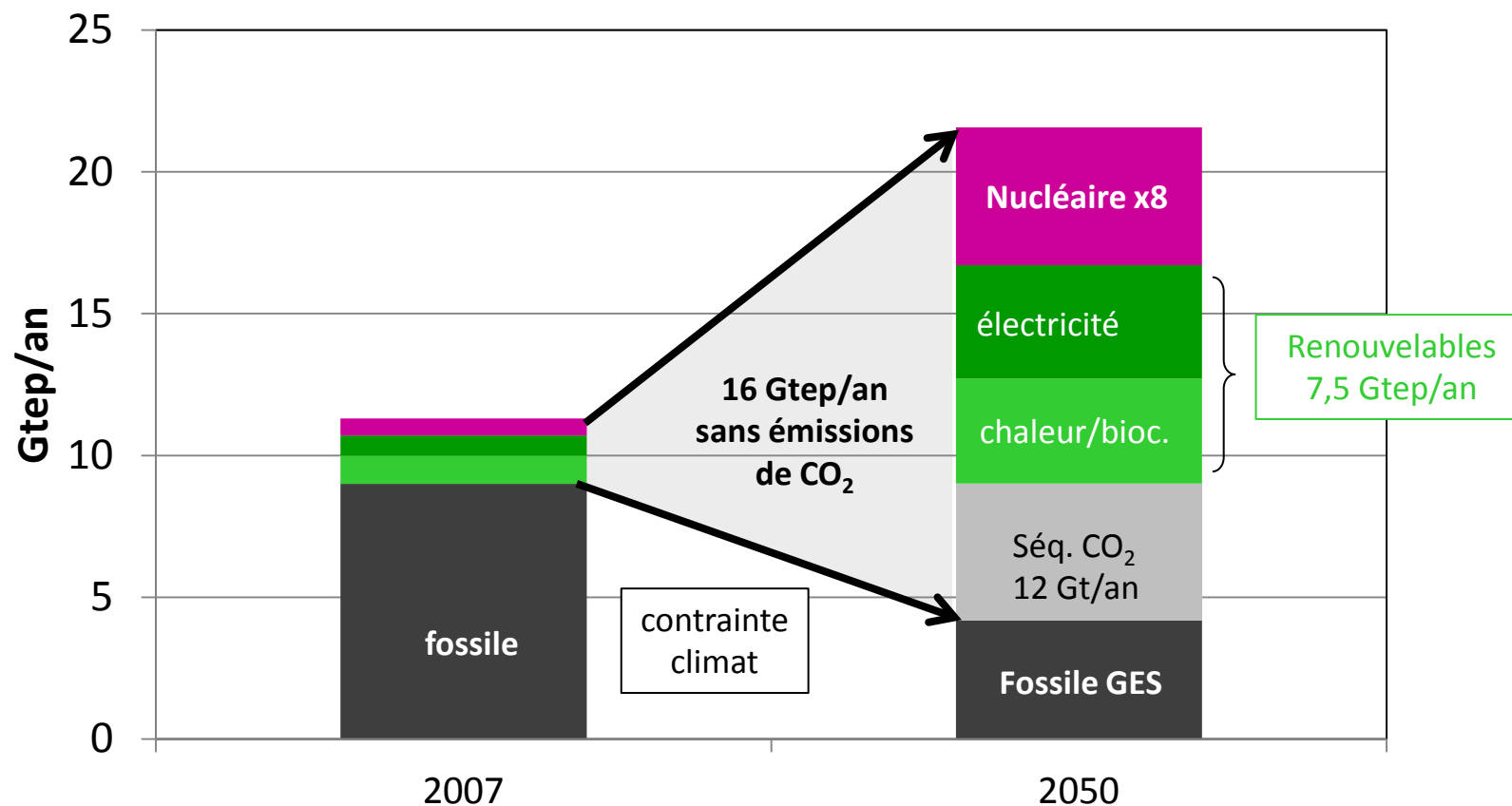


Transfert sur l'électricité

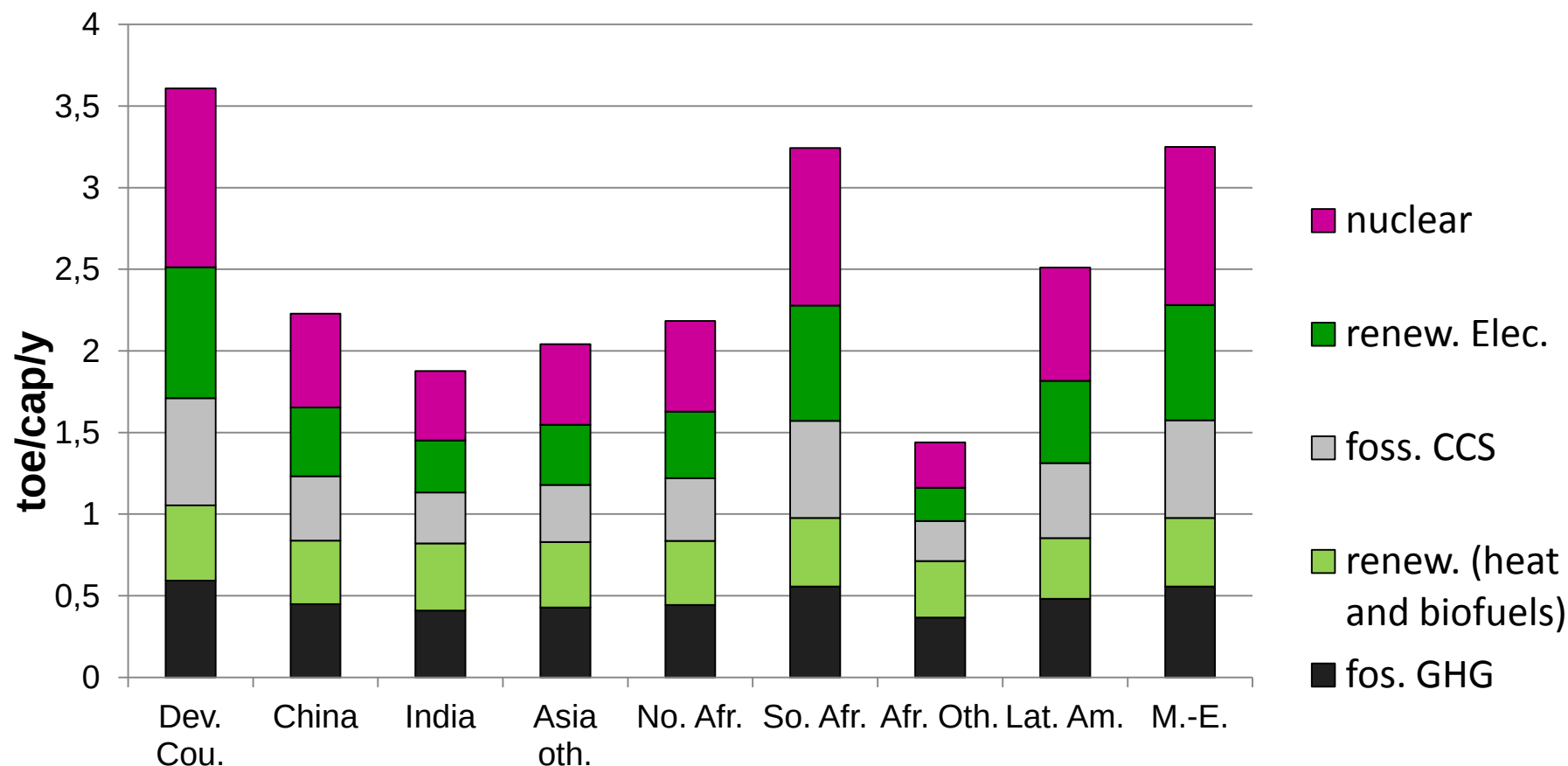
La cogénération et les pompes à chaleur aident à limiter le « surplus » de consommation



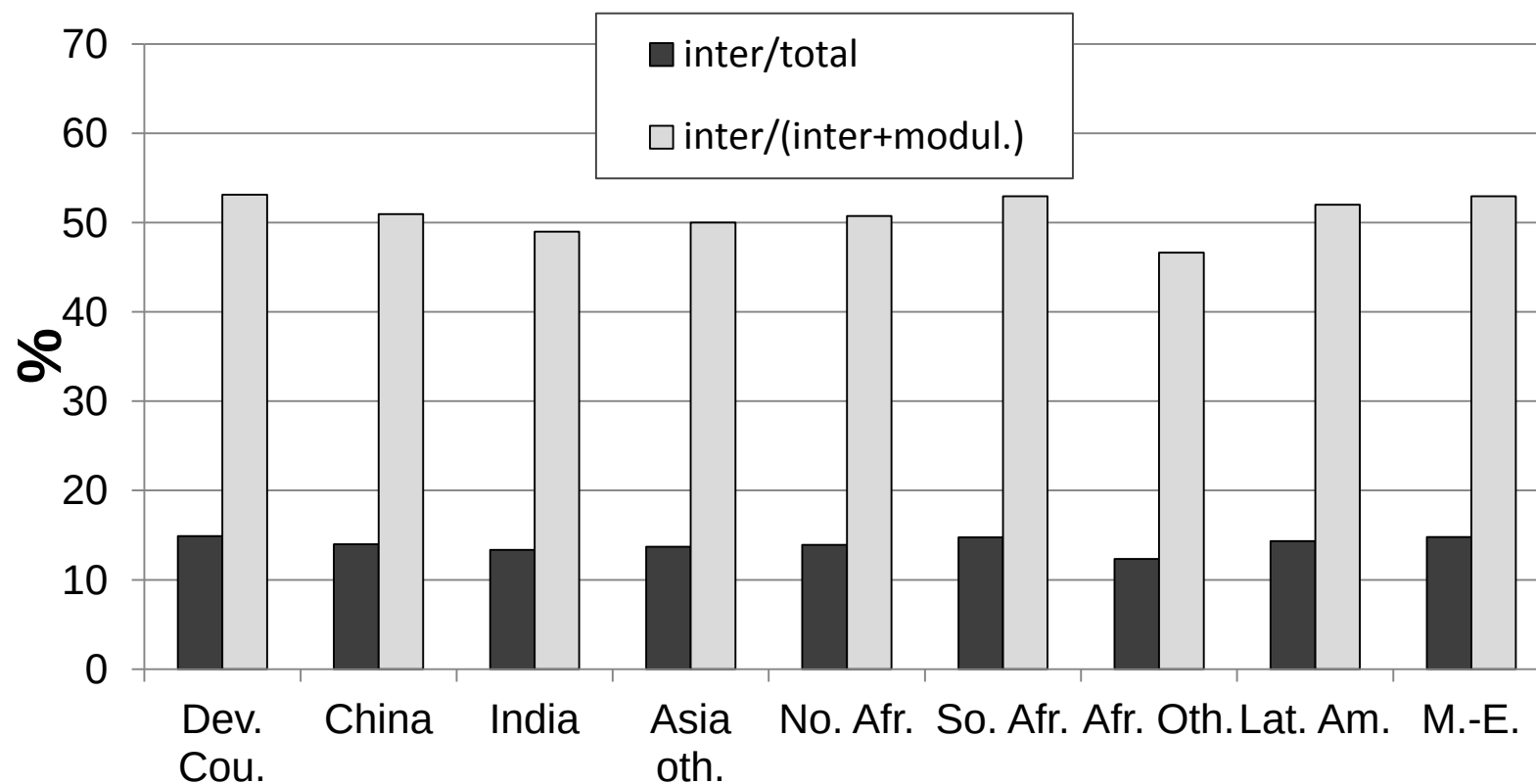
Mix énergétique mondial



Mix par grandes régions du monde



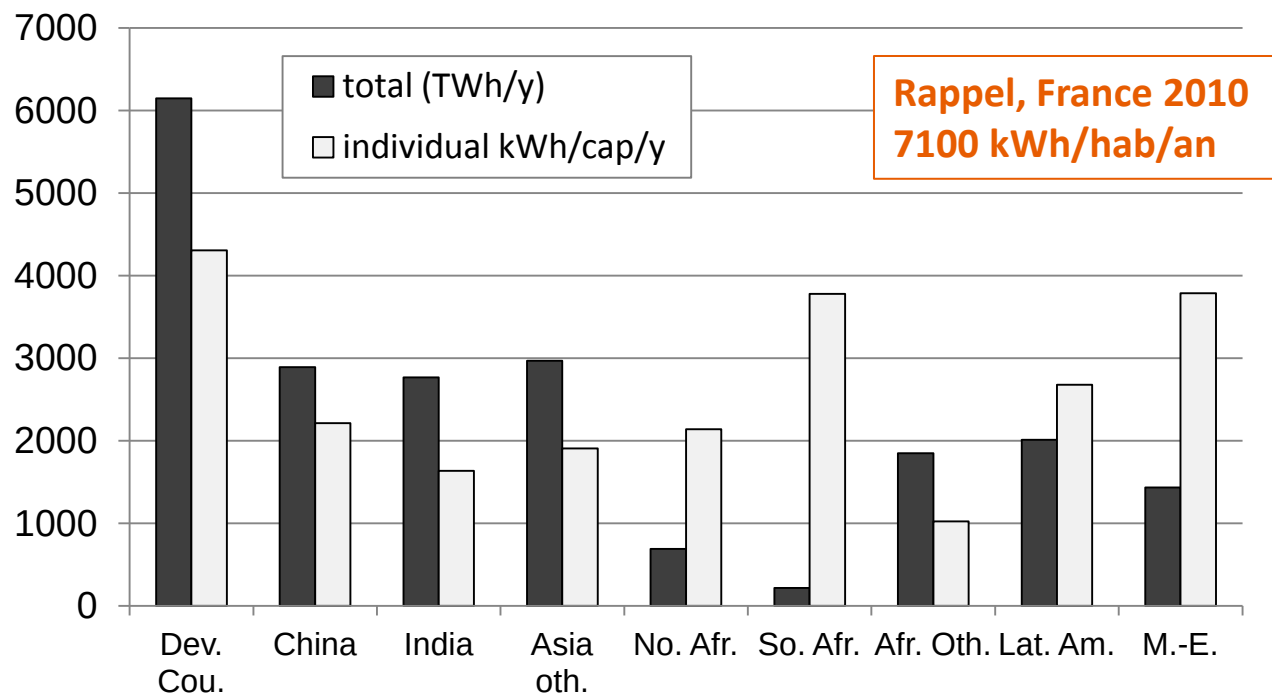
Gestion difficile de l'intermittence



Résultats : Focus sur le nucléaire

Nucléaire x8 au niveau mondial

Répartition géographique
« par habitant »



Rappel : cas français ~60 réacteurs en 20 ans pour 60 Mhab

D'ici 2030, la croissance du nucléaire sera très faible, si déploiement il y a, ce sera après 2030

440 → 2000 réacteurs entre 2030 et 2050 : ~2500 réacteurs à construire en 30 ans = 80/an

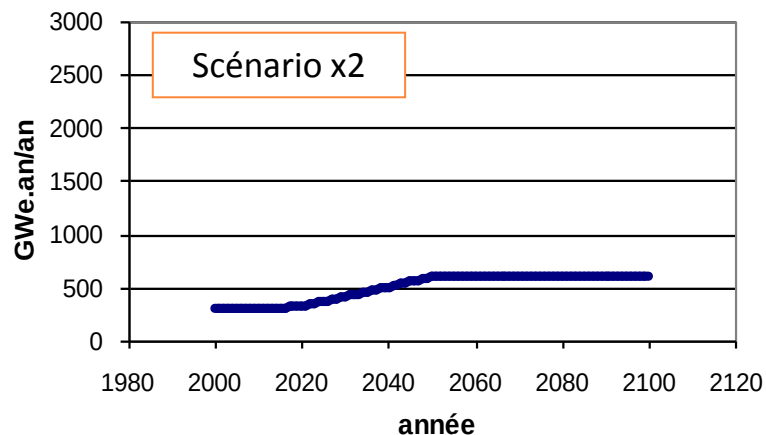
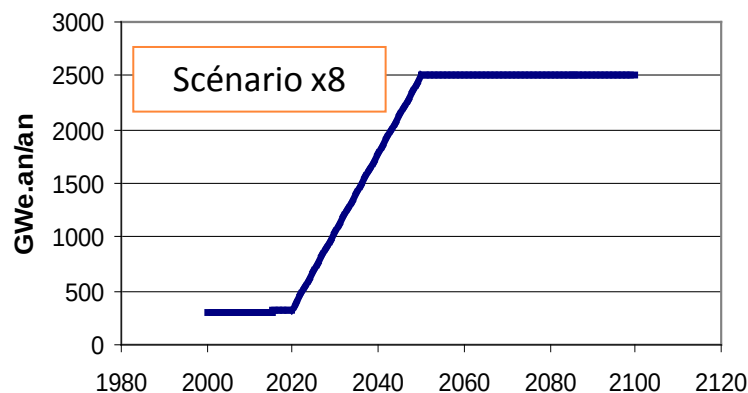
Population concernée : urbains des pays développés et émergents = 6 Ghab

France 1075-1995 appliquée à 6Ghab = 6000 réacteurs en 20 ans...

Résultats : Focus sur le nucléaire

Scénario 100% Gen2 + Gen3

Demande nucléaire mondiale

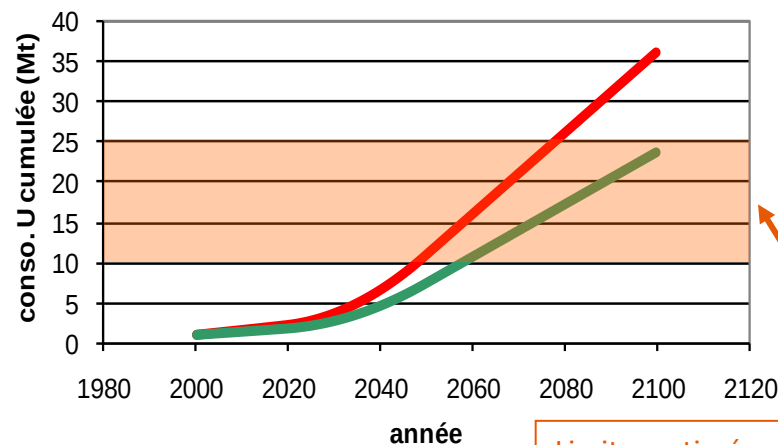


— 200t/(GWe.an)

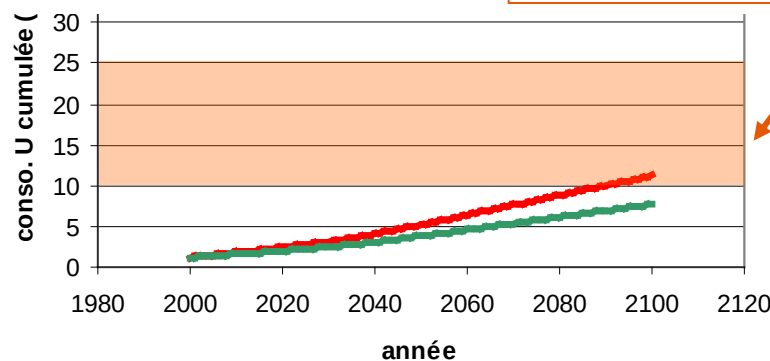
— 130t/(GWe.an)

↘ rejet ^{235}U dans U_{app} , recyclage U, Pu

Consommation cumulée d'U naturel



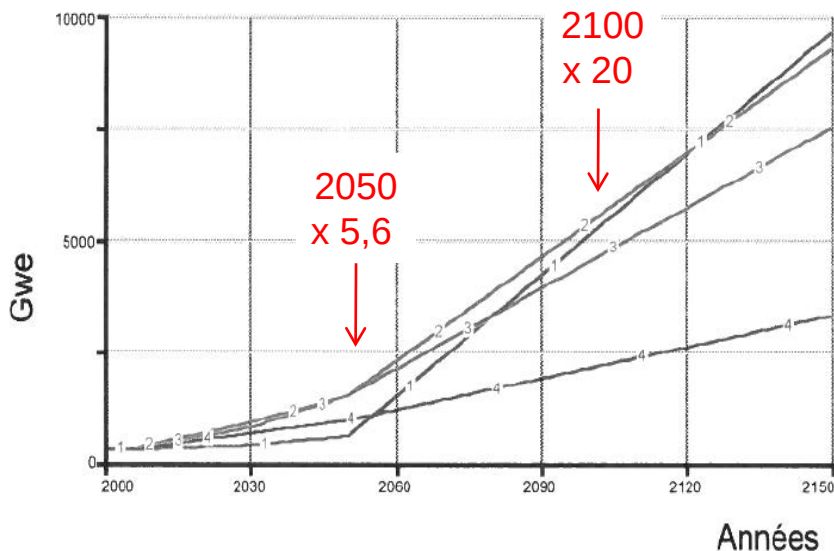
Passage à la
régénération
indispensable
Conso. U
1t/an/GWe



Nucléaire du futur

La demande nucléaire peut être amenée à croître significativement d'ici 2050
C'est encore plus vrai si on considère l'horizon 2100
De plus en plus de scénarios technico-économiques envisagent un tel déploiement (c'était moins vrai il y a 10 ans)

IIASA A2 IIASA A3 IIASA B IIASA C2



Réf: CEA/I-Tese, JG Devezeaux, CNE, Nov 2010

MWe **Deploiement du parc « baseline »**

