

Les nouveaux horizons du nucléaire



In2p3

S. David

CNRS/IN2P3

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

sdavid@ipno.in2p3.fr

PACEN

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

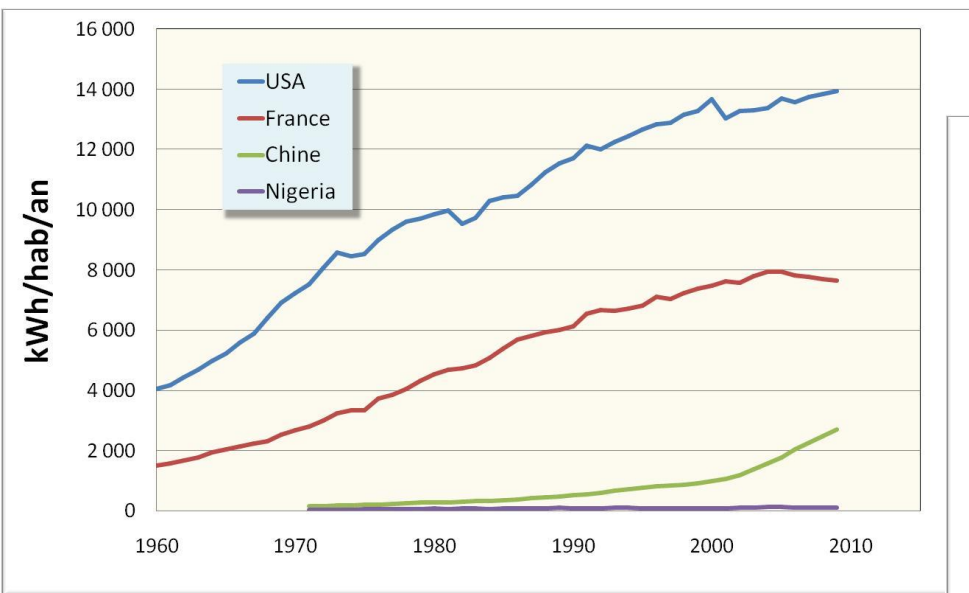
442 réacteurs de puissance fonctionnent dans 31 pays différents

Puissance installée 375 GW

Production 2009 = 2560 TWh = 292 GWe moyens

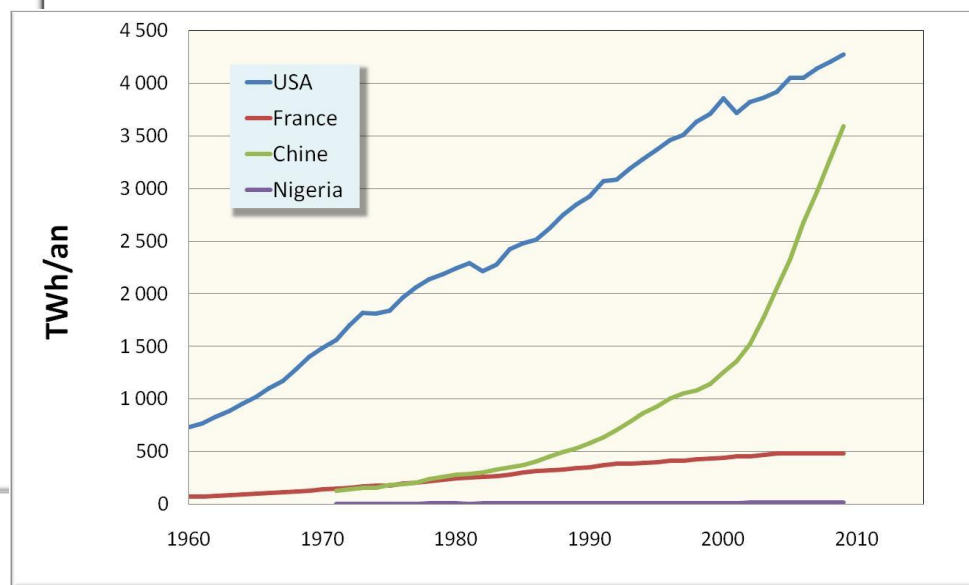
Contexte énergétique

Une grande disparité dans la consommation d'énergie par habitant



Une demande d'énergie qui croît

- faiblement dans les pays riches
- très vite dans les pays émergents
- encore peu dans les pays pauvres



*Chine : la production annuelle augmente de +300 TWh chaque année
= +1 France tous les 1,5 ans (essentiellement en charbon)*

Une vision « énergie 2050 »

Construction
d'un monde énergétique
en 2050

S. Bouneau, S. David, J.-M. Loiseaux, O. Méplan



Construction d'un monde énergétique en 2050

Hypothèses

- Population de 9 milliards en 2050
- Consommation d'énergie mondiale 20 Gtep/an
- Réduction par 2 des émissions des gaz à effet de serre

Principe

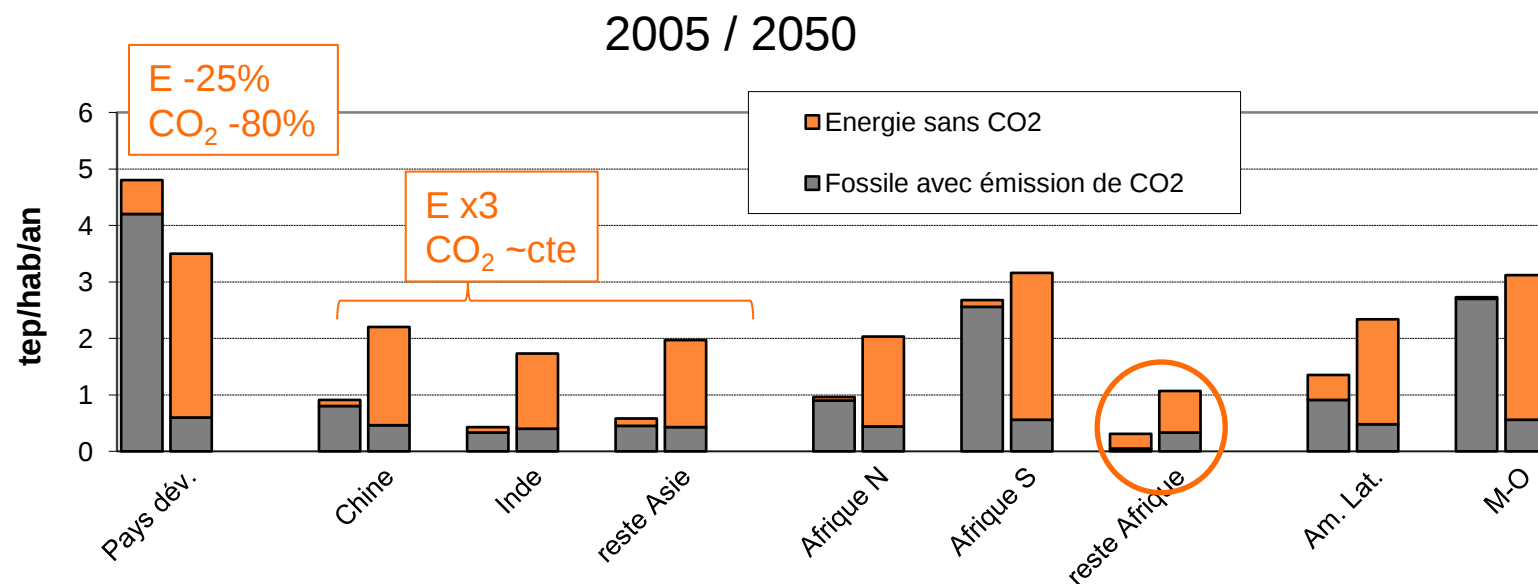
- Réduction des inégalités mondiales de consommation et d'émissions de GES
- Adéquation des sources aux besoins : transport, chaleur HT, BT, électricité

Nucléaire

- Utilisé uniquement pour les populations urbaines les plus consommatrices
- Besoins concentrés, développement technologique
- « Variable d'ajustement » après avoir poussé au maximum les renouvelables et le captage du CO₂.

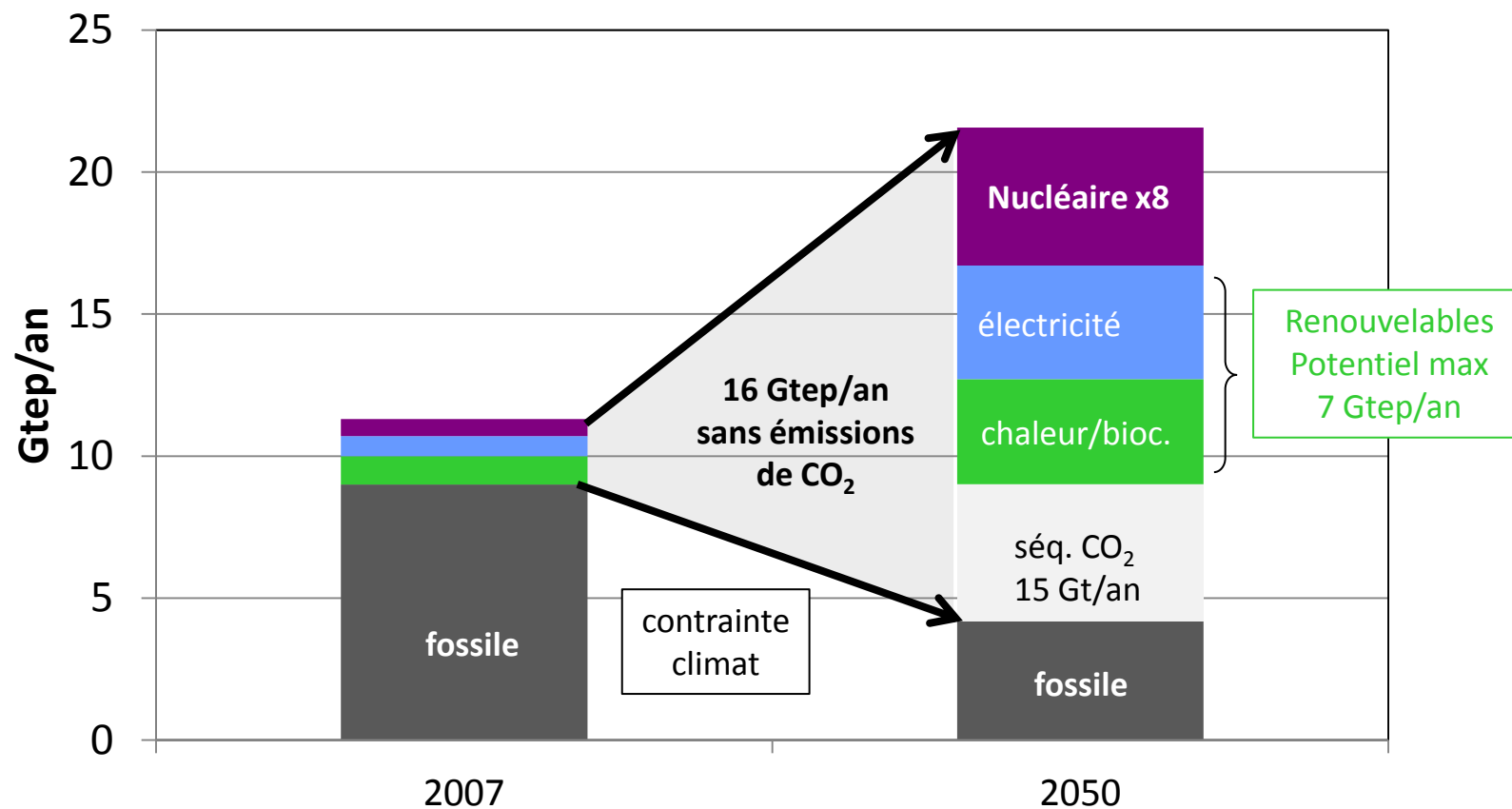
Une vision « énergie 2050 »

Consommation d'énergie et émissions de CO₂
obtenues selon les grandes régions du monde
Etot = 20 Gtep/an



Une vision « énergie 2050 »

Un recours massif au renouvelables, au nucléaire et à la séquestration du CO₂



Nucléaire du futur

Nucléaire

4,85 Gtep/an = 8 fois plus qu'aujourd'hui

Sources de « chaleur » sans CO₂ insuffisantes : chaleur nucléaire ~0,6 Gtep/an

Réacteur de référence : EPR, 1650 MWe, $f = 90\%$, soit 13 TWh/an = 2,8 Mtep/an

1 Gtep/an : 360 réacteurs = 594 GWe installé = 4680 TWh/an

Au niveau mondial

8 fois plus qu'aujourd'hui

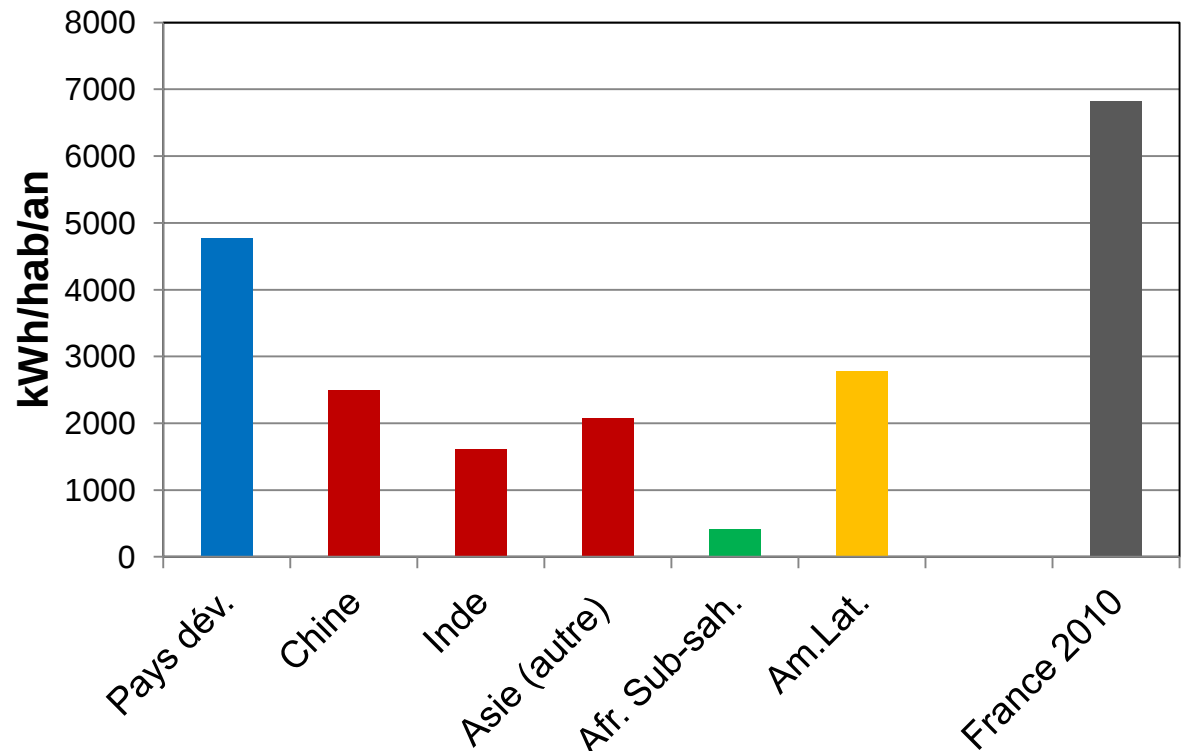
~4 fois plus de réacteurs (1750)

~200 réacteurs / milliard d'habitant contre 65 aujourd'hui (facteur 2.7)

Nucléaire du futur

Nucléaire x8

Répartition géographique
« par habitant »



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

D'ici 2020, la croissance du nucléaire sera très faible, si déploiement il y a, ce sera après 2020, voire 2030

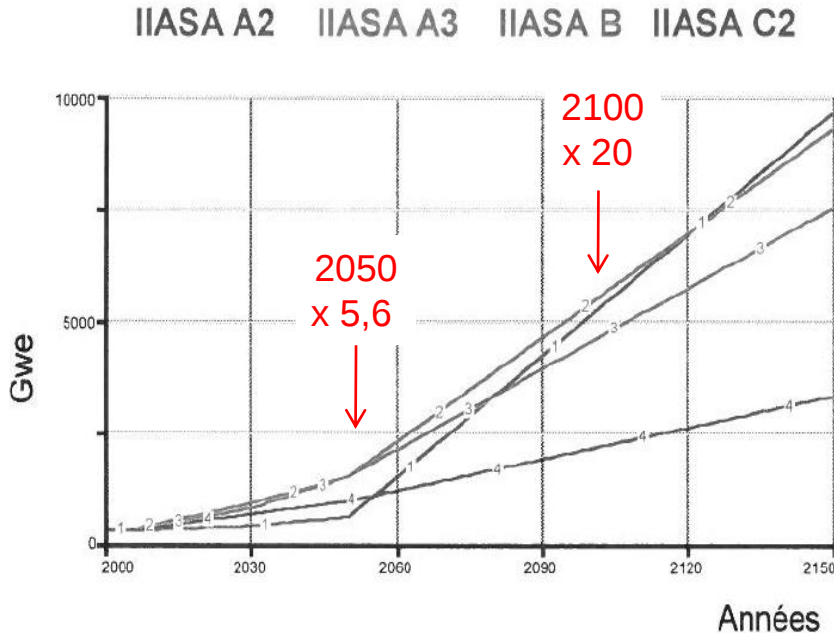
440 → 1750 réacteurs entre 2030 et 2050 : ~2000 réacteurs à construire en 30 ans

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

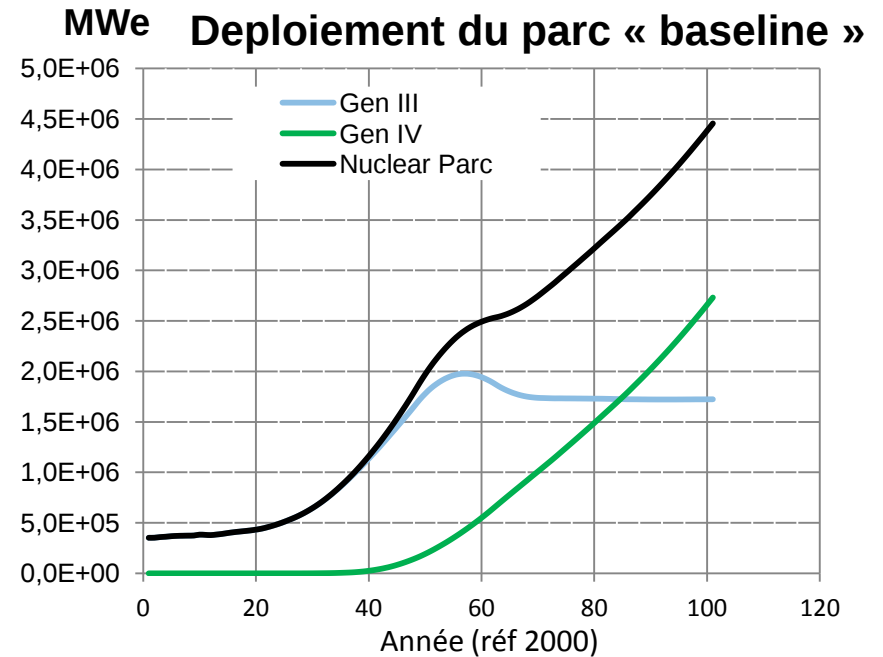
Ramené à la France : 20 réacteurs en 20 ans

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)



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



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 naturel 200 t

Possibilité de réduire à 130t/GWe.an

réduction ^{235}U dans U appauvri

recyclage U

recyclage Pu

Sans rupture technologique

Filières régénératrice



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

Si RNR d'ici 20100 : Pu actuel = matière précieuse

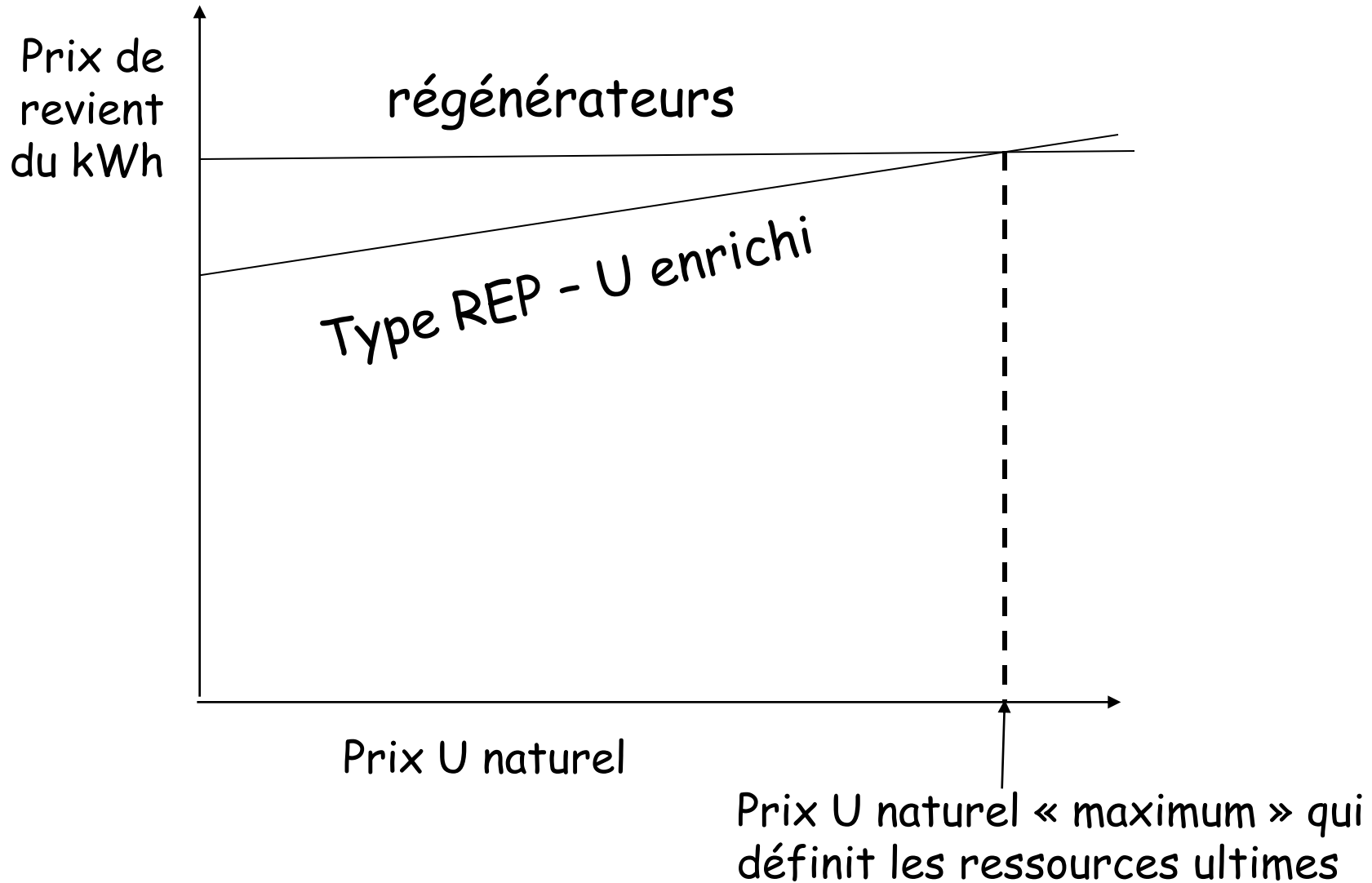
Technologie plus complexe (donc plus chère)

Réacteurs à neutrons rapides indispensables

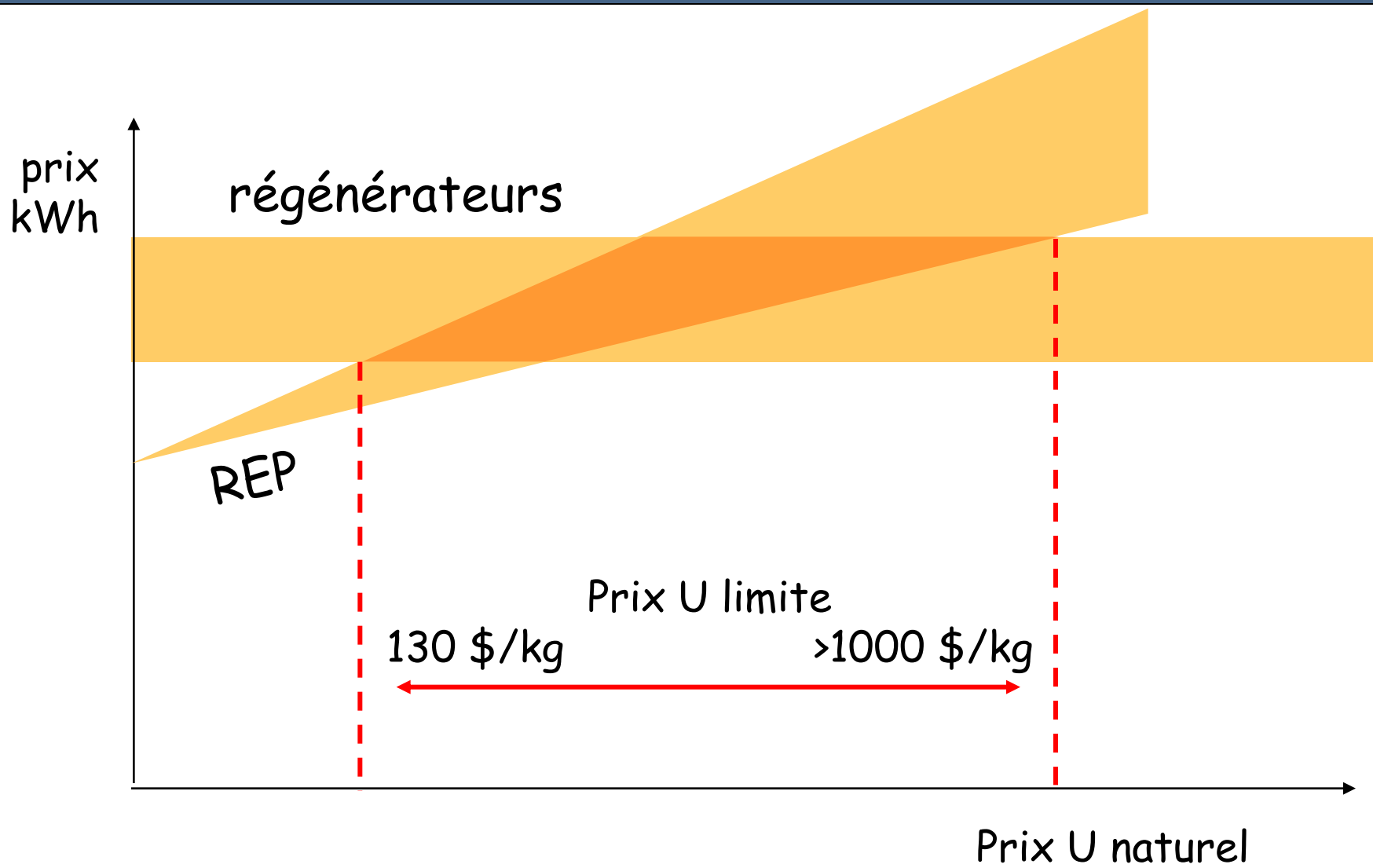
Cycle thorium possible



À un moment donné, les régénérateurs deviennent compétitifs



Mais avec les incertitudes...



Nucléaire du futur

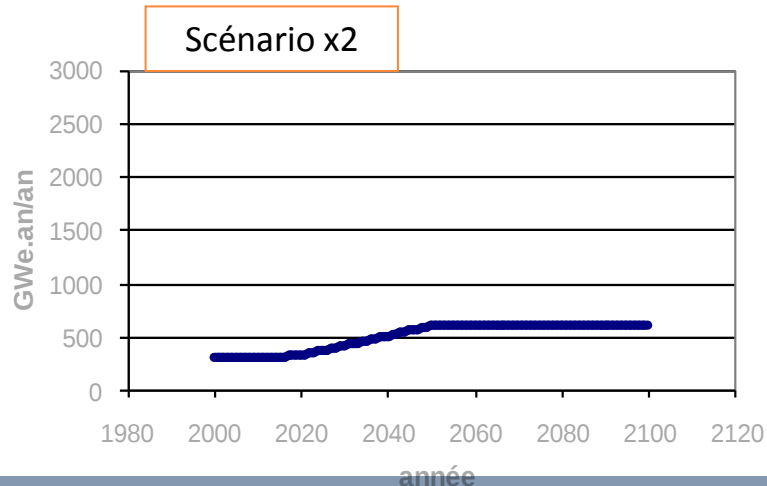
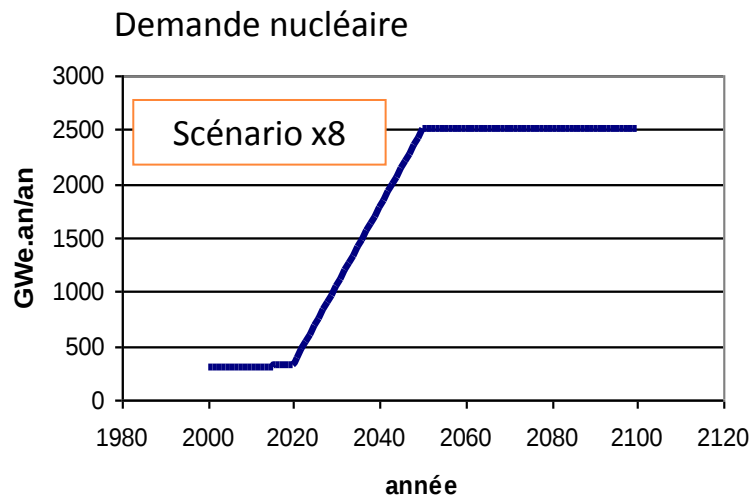
Production nucléaire mondiale	285 GWe (éq. pleine puissance)
Consommation mondiale d'U nat	60000 t/an
Réserves U (RRA+RSE+spéculatives)	10-23 millions of tons
Potentiel de production	
- au taux actuel (et utilisation actuelle de U)	200 – 400 years
- scénario « nucléaire x 10 » et optimisation de l'utilisation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

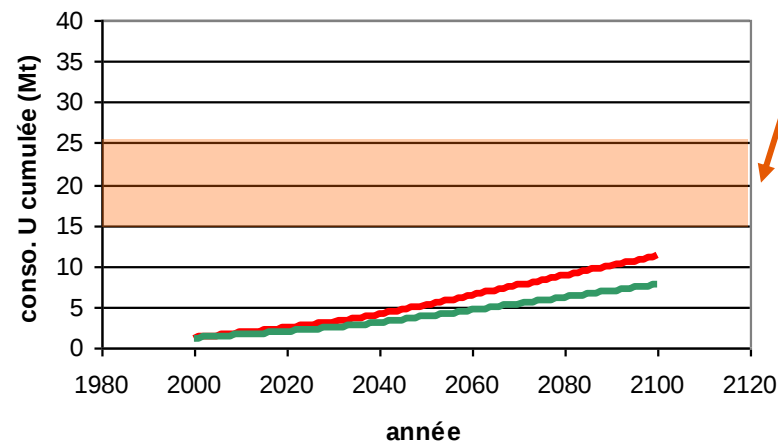
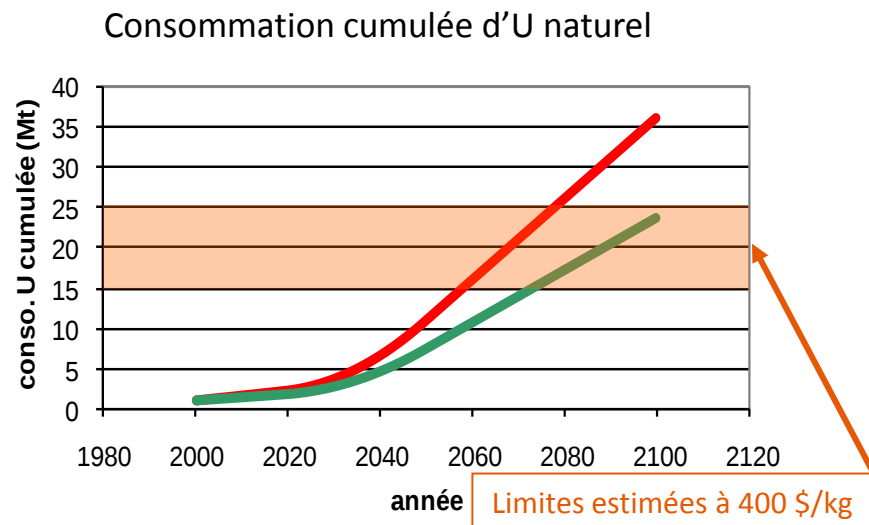
attention à cette vision « naïve » d'une séquence Gen3 puis Gen4

Potentiel des filières actuelles

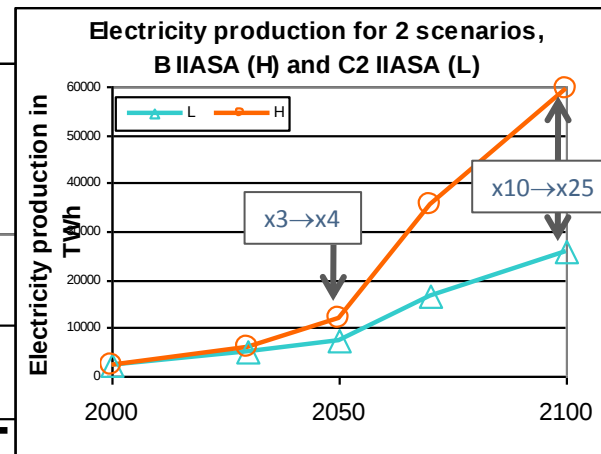
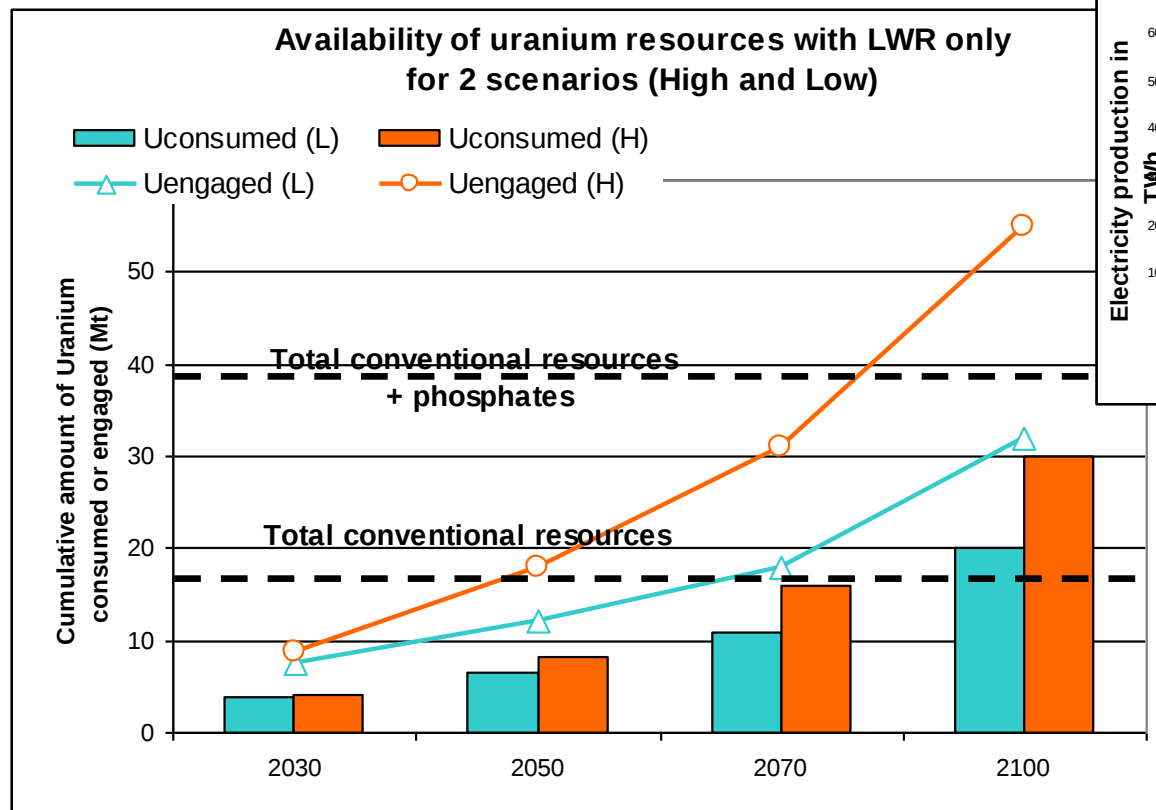
Scénario 100% Gen2 + Gen3



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



Prendre en compte l'Uranium « engagé »



Anticipation, « peur de manquer d'U » → accélère le besoin de la régénération

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

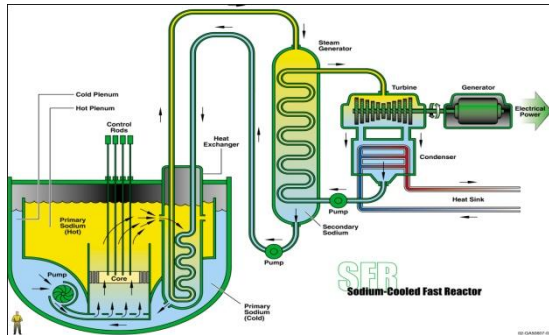
Mine	Production 2005 (t/an)
Mac Arthur River	7 200
Ranger	4 589
Olympic Dam	3 388
Krasnokamensk	3 037
Rossing	2 583
Arlit	1 750
Rabbit Lake	1 544
Akouta	1 403
Akdala	1 000

Réf M. Delpech, CEA/DEN

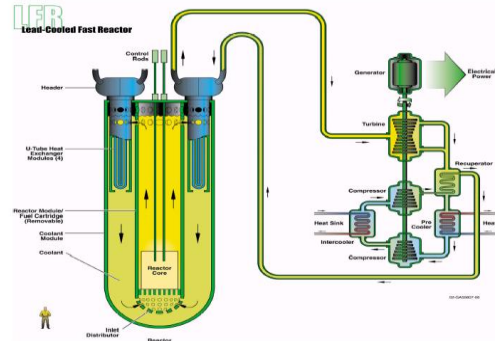
⇒ co-existence des systèmes de 3^{ème} et 4^{ème} génération

Technologie des régénérateurs

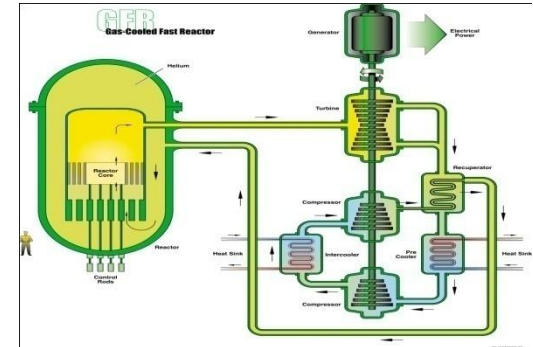
Na



Pb



He

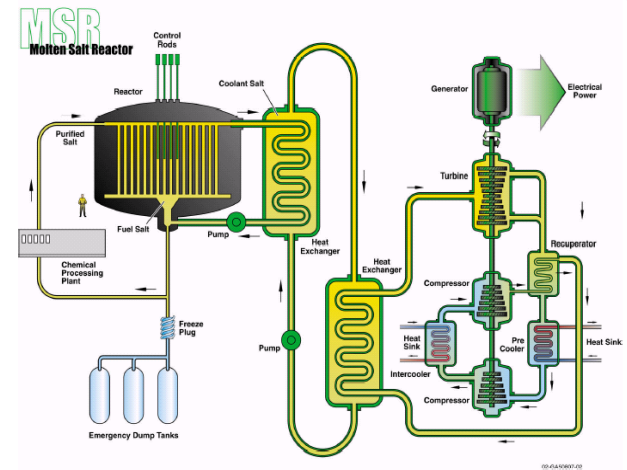


Neutrons rapides nécessaires pour obtenir la régénération

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



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

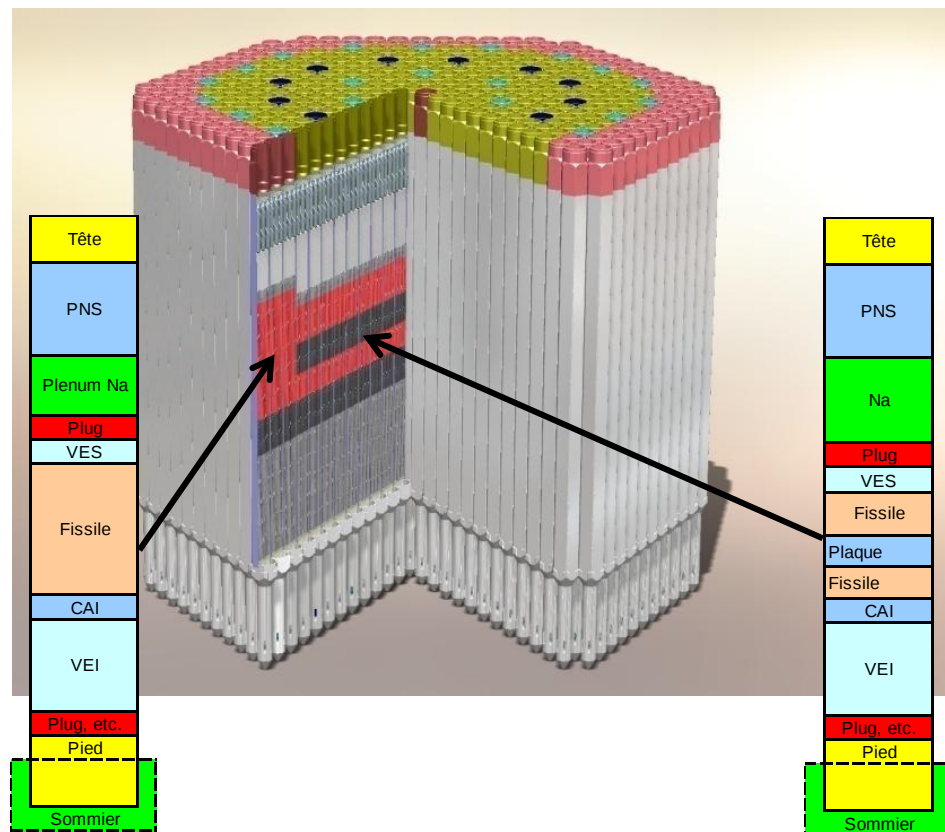
- **Capacité à transmuter les actinides mineurs**

- **Irradiations expérimentales**

Cœur à faible Vidange

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

Etudes à poursuivre

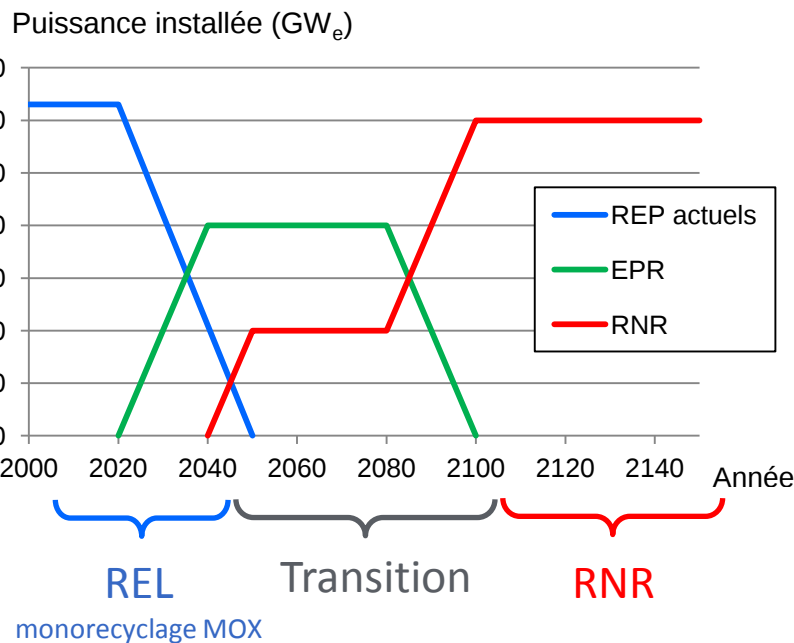


La question de l'inventaire Pu

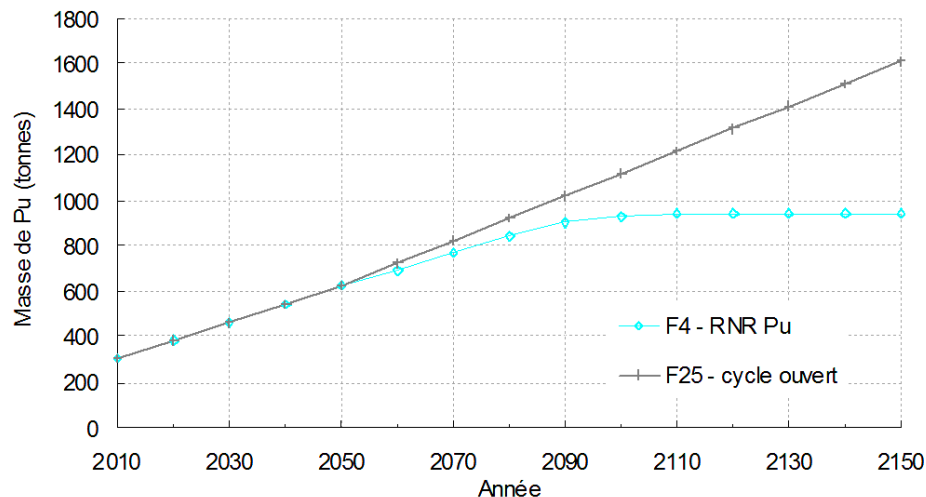
Superphénix 12 tonnes de Pu en cycle par GWe

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



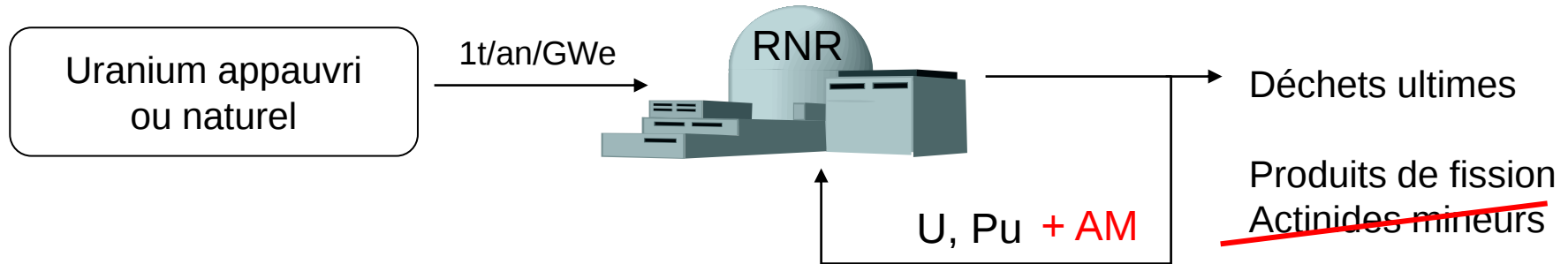
Réf A. Leudet, COSSYN, 2010

Une vitesse de déploiement limitée par la disponibilité du Pu
Plus de souplesse si co-existence durable Gen3-Gen4

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 possible des actinides mineurs**

⇒ Recyclage U+Pu+AM, déchets ultimes minimisés

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

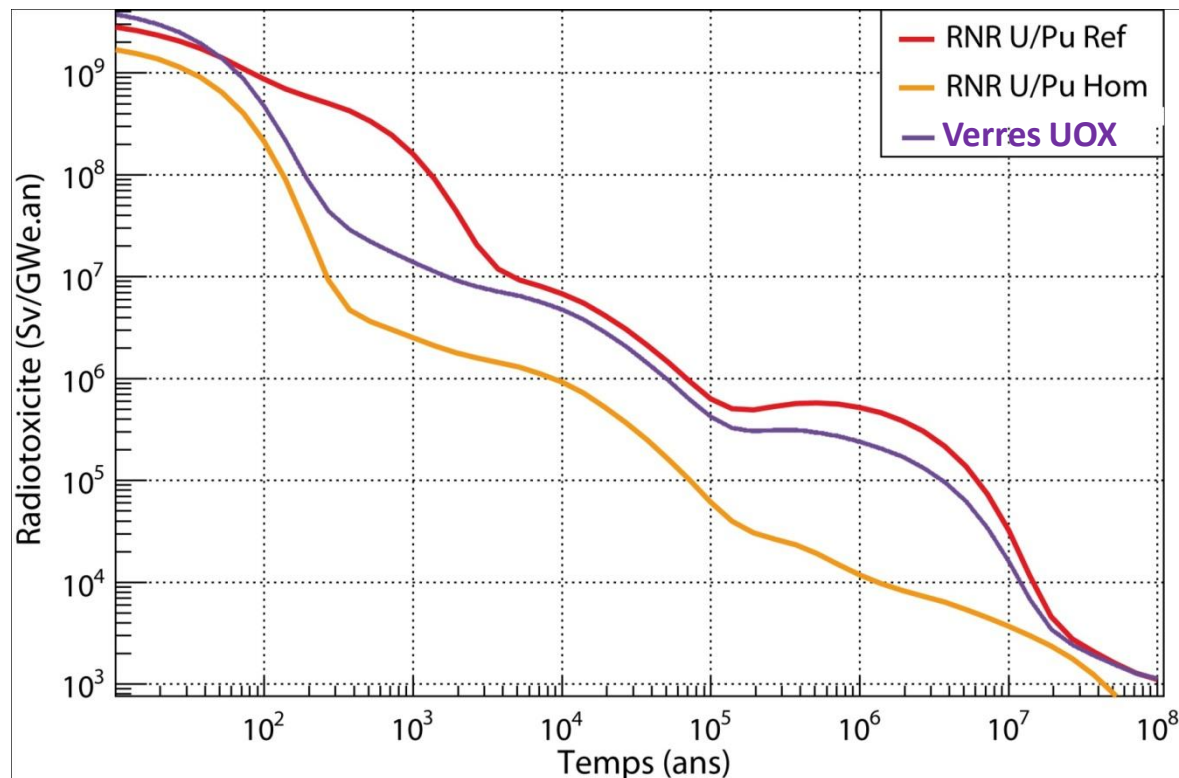
Am : 32 tonnes
Cm : 8 tonnes

	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

Transmutation des actinides mineurs

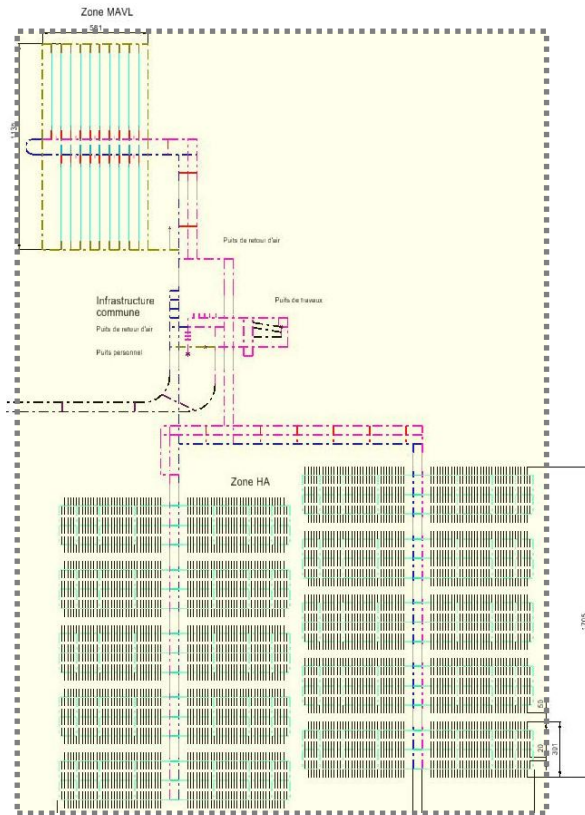
Rappel : sans transmutation, les verres issus des RNR-Na sont plus radiotoxiques que ceux issus du traitement des UOX

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



Transmutation : impact sur le stockage

Sans transmutation (70 ans)

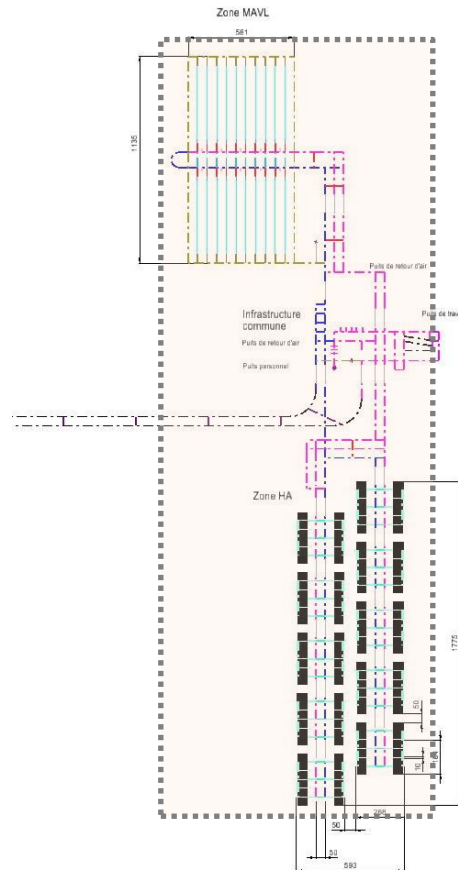


Zone HA : 510 ha (1)

Total stockage : 1200 ha (1)

Vol. excavé : 4,6 Mm³ (1)

Transmutation AM (120 ans)



Zone HA : 110 ha (/ 4.6)

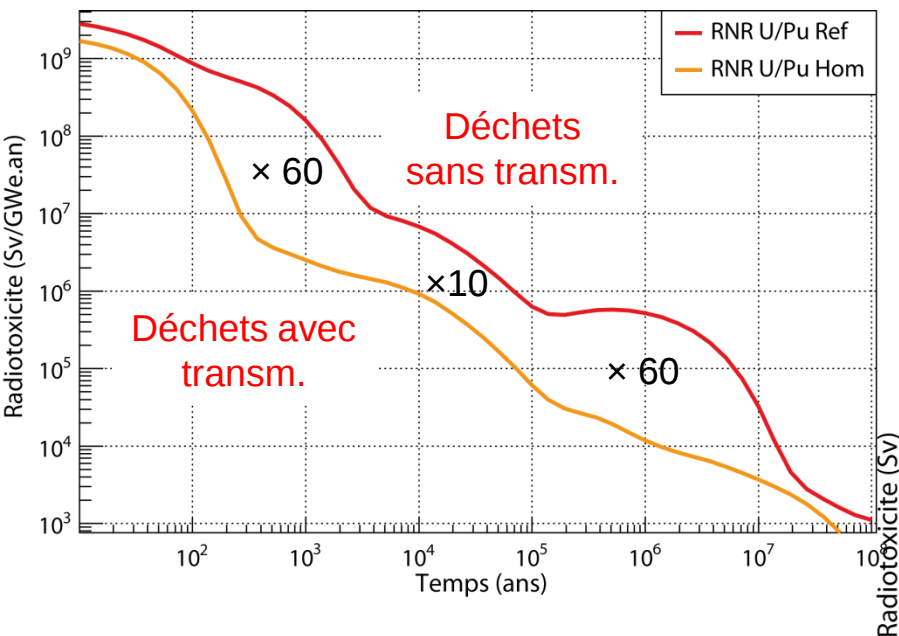
Total stockage : 470 ha (/ 2.5)

Vol. excavé : 3,0 Mm³ (/ 1.5)

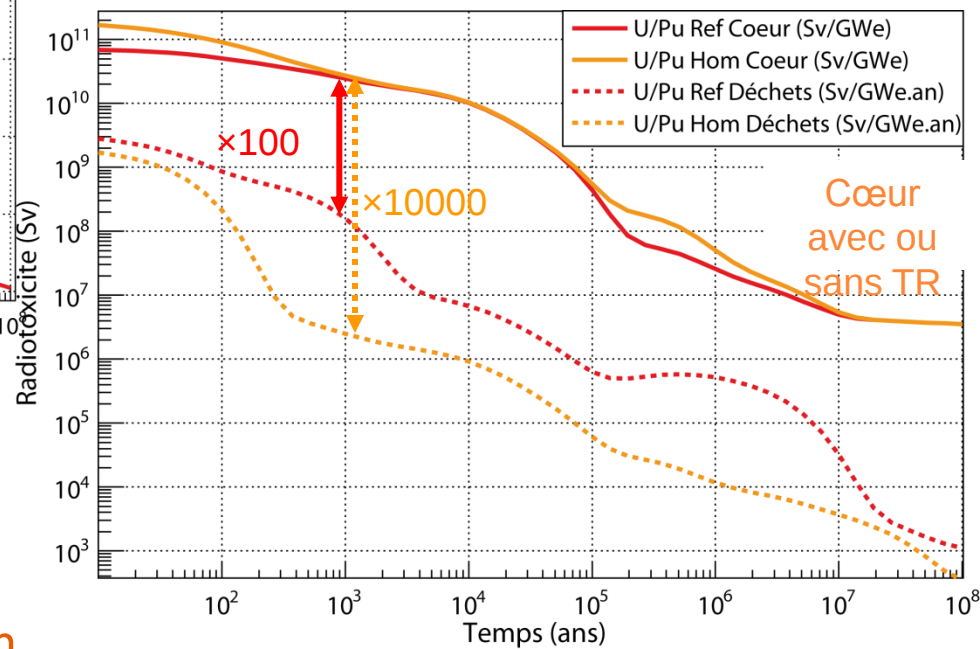
Impact important sur la surface de stockage HAVL, moyennant une augmentation de la durée d'entreposage

Transmutation vs inventaire 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 !)



Cela incite à :

- Chercher à limiter l'inventaire de matière fissile en cycle
- Envisager des stratégies d'incinération du Pu en fin de jeu (concept CAPRA)

Un mot sur le cycle thorium



La régénération est théoriquement possible en spectre thermique, avec des inventaires de matières fissiles réduits d'un facteur 10

Par exemple du parc français

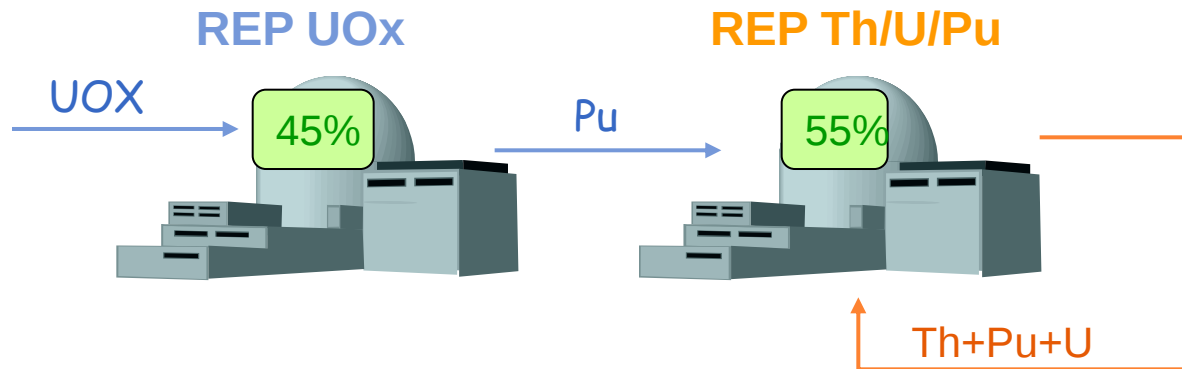
- 1100 tonnes Pu en RNR-Na
- ~100 tonnes d' ^{233}U

Dans la pratique, un réacteur thermique s'empoisonne très vite (produits de fission)
Deux voies d'utilisation sont alors envisageables

- thorium en REP : sous-générateur mais réduction de la consommation d'U
- thorium en réacteur à sels fondus : régénérateur, mais technologie complexe

Cycle thorium en REP

Un exemple d'utilisation ne faisant intervenir que des REP

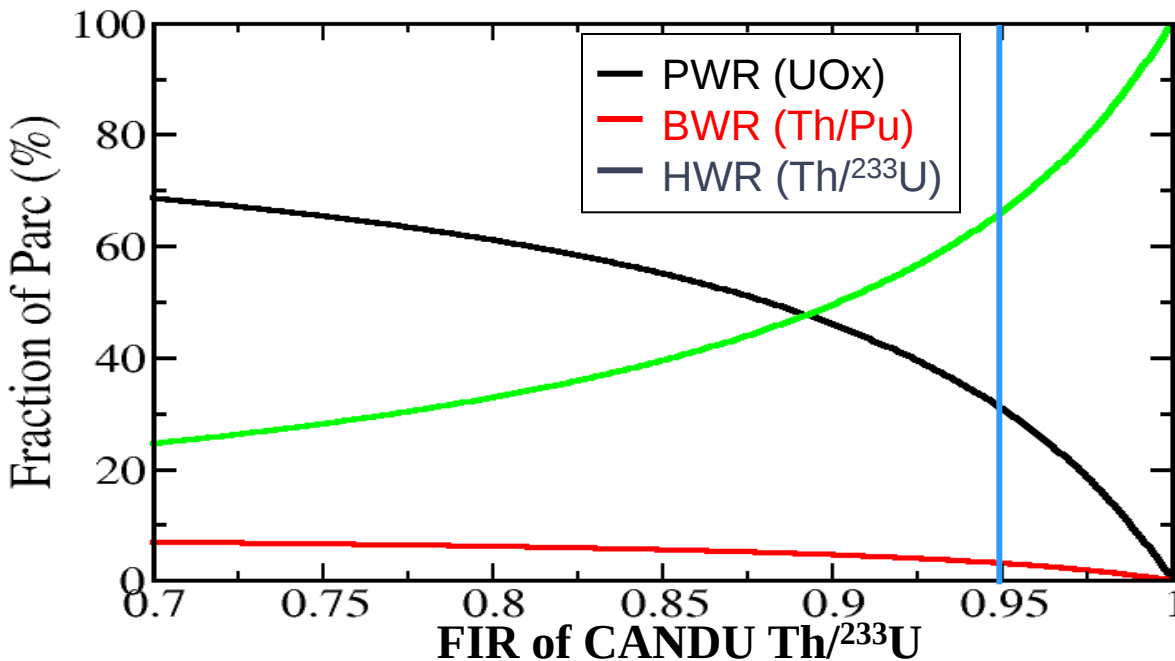
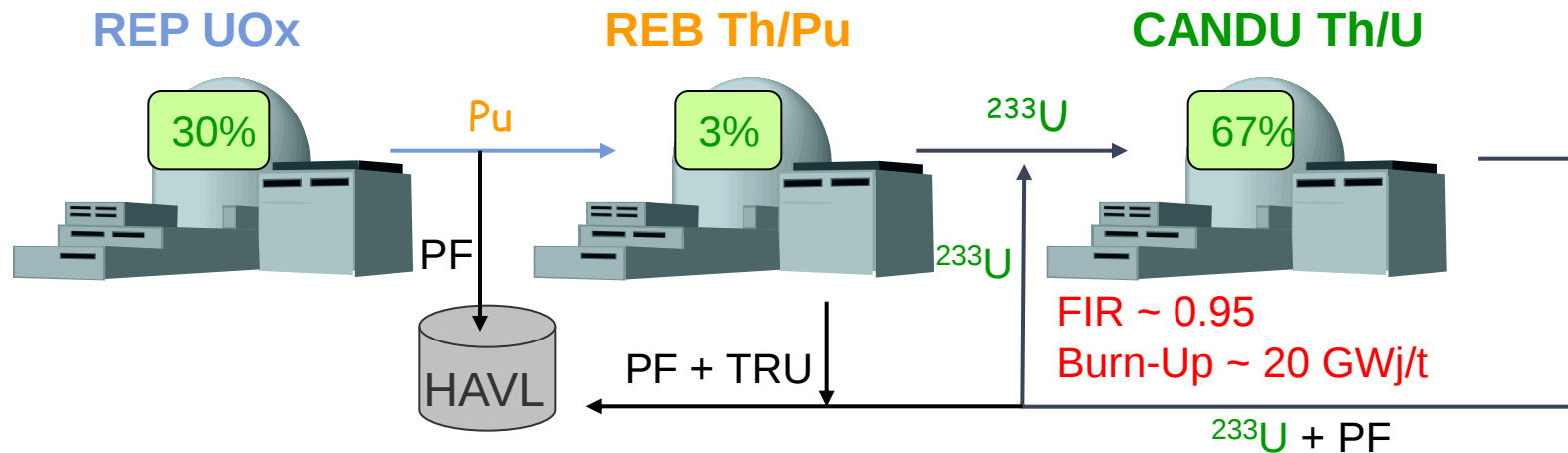


Réduction de 55% de la consommation d'U enrichi, en n'utilisant que des réacteurs de type REP

Limitation des inventaires de matière fissile

Ajouté aux améliorations en amont du cycle UOX, la réduction de consommation atteint 70% par rapport à aujourd'hui

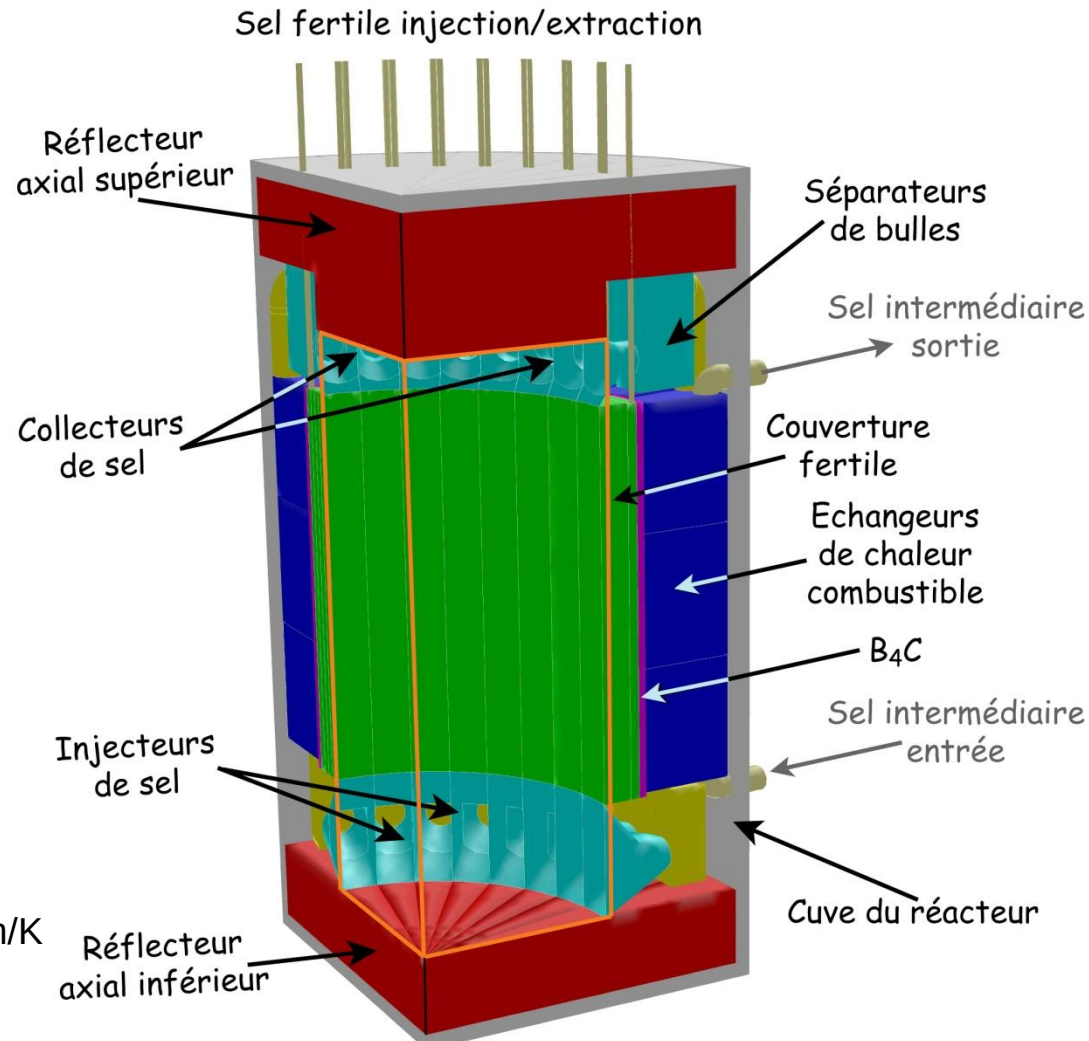
Cycle thorium en réacteurs à eau optimisés



- Le cycle thorium permettrait de réduire la consommation d'uranium de façon continue, sans recours aux RNR, et prolonge ainsi l'utilisation des réacteurs à eau
- Les hauts taux de conversion sont pénalisants (car burn-up court) : recherche d'un optimum

Cycle thorium : Le MSFR de référence

- 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
- Diamètre intérieur du cœur: 2,26 m
- Hauteur cœur plus plenums: 2,26 m
- Hauteur des plenums: 2 x 0,16 m
- Epaisseur de la couverture: 50 cm
- Volume de la couverture: 7,7 m³
- Sel de la couverture: 77,5%LiF, 22,5%ThF₄
- Retraitement de la couverture: 40 l/j
- Coefficient de température: de -5,3 à -4,8 pcm/K
- Production d'²³³U: 95 kg/an
- Temps de doublement: 56 ans



Conclusion

L'énergie nucléaire devrait être amenée à jouer un rôle majeur

- demande d'énergie croissante
- lutte contre les émissions de gaz à effet de serre
- mais le nucléaire est-il compatible avec un marché libéralisé? (sûreté, coûts investissements, ...)

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 ?

- disponibilité industrielle, coût associés
- aspects de sûreté (vidange, sodium)

Fukushima peut limiter le déploiement du nucléaire

- souplesse nécessaire dans les stratégies
- le statut du plutonium est plus que jamais ambigu : déchet ou matière valorisable ?

Le cycle thorium peut apporter de la souplesse

- limitation des inventaires de plutonium
- réduction continue de la consommation en Uranium sans changer de technologie réacteur
- et sans interdire une transition ultérieure vers la régénération

Sommes-nous la vaillance, ou le dernier coquelicot ?

Alain Bashung

Merci pour votre attention