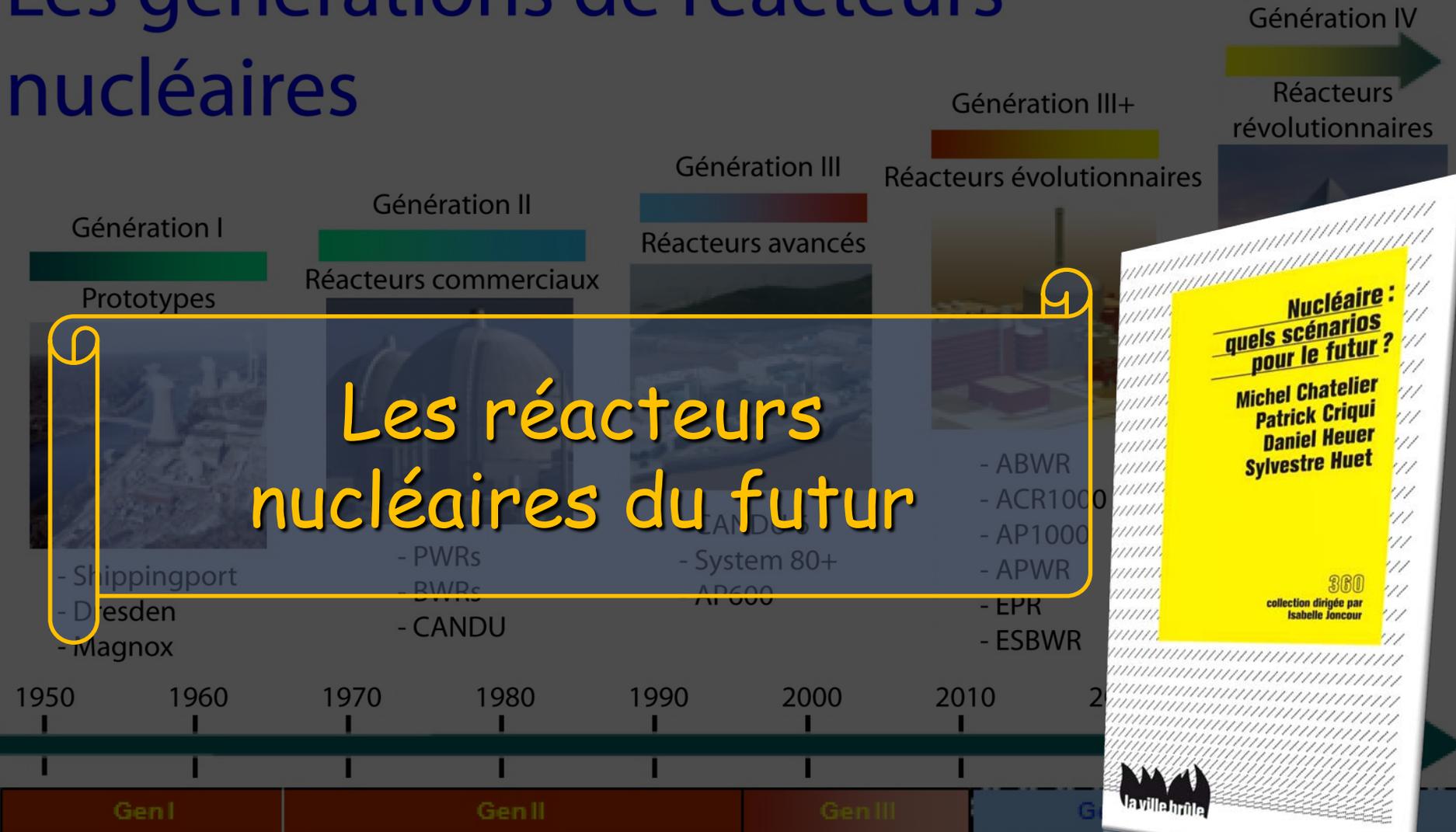
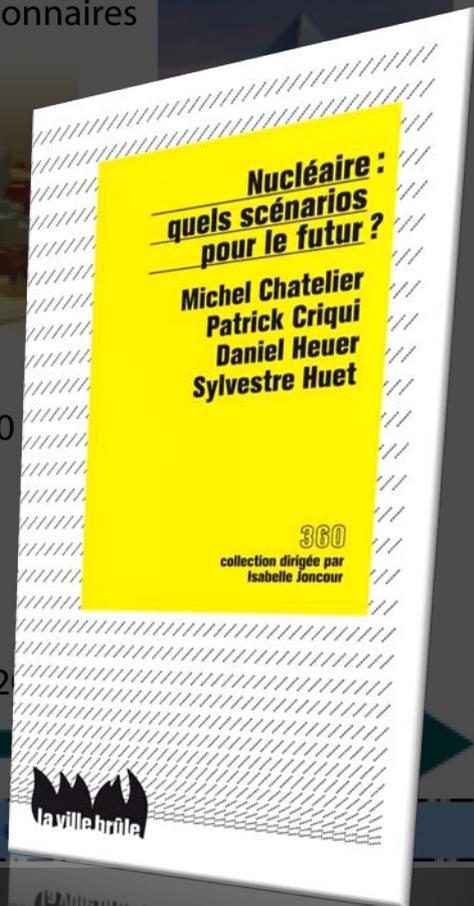


Les générations de réacteurs nucléaires



Les réacteurs nucléaires du futur



Daniel Heuer
Directeur de recherche au CNRS

Quels sont les critères d'évaluation d'un réacteur nucléaire de fission du futur ?

Économie des ressources

- **Le réacteur doit être au moins proche de la régénération**
 - Cela impose que le combustible soit retraité régulièrement

Minimisation de la production de déchets

- **Les actinides doivent être recyclés**
- **Les actinides des réacteurs actuels doivent pouvoir être traités par ces réacteurs du futur**
- **Les déchets dus aux éléments de structures et aux procédés de retraitement doivent être minimisés**

Potentialité de déploiement

- **L'inventaire initial doit être minimisé**
- **De la matière fissile doit être disponible en quantités suffisantes**

Sûreté optimale

- **Il ne doit jamais être nécessaire d'évacuer les populations vivant à proximité du réacteur**
 - Ceci est facilité si
 - tous les coefficients de contre réaction sont négatifs
 - il n'y a pas de matériaux fortement réactifs dans et à proximité du cœur
 - En règle générale, si il n'y a pas de risque de sur accident

Non prolifération

- **La matière fissile surgénérée doit être beaucoup plus difficilement proliférante que l'enrichissement de l'uranium naturel**

Compétitivité économique

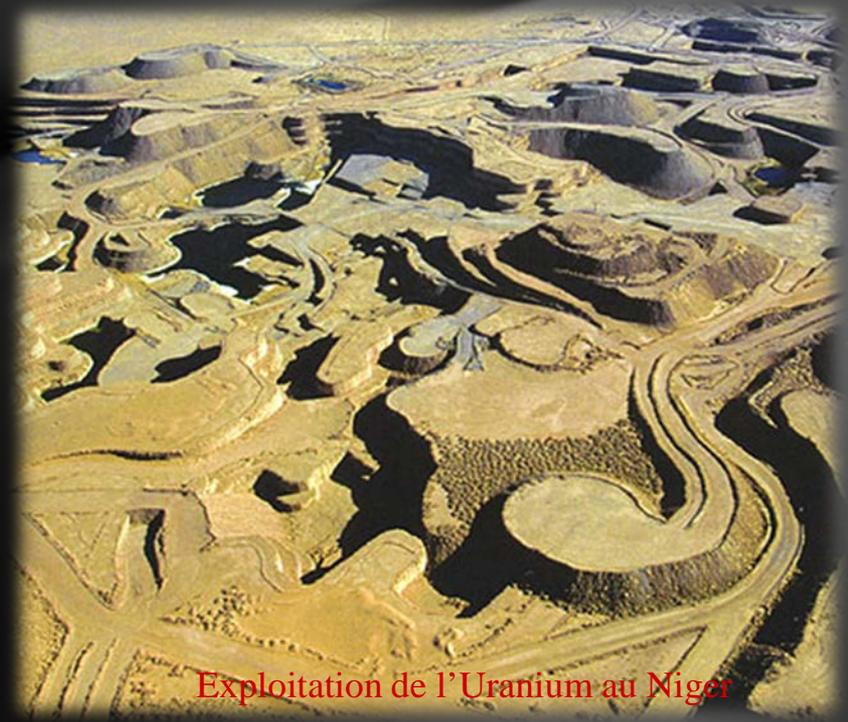
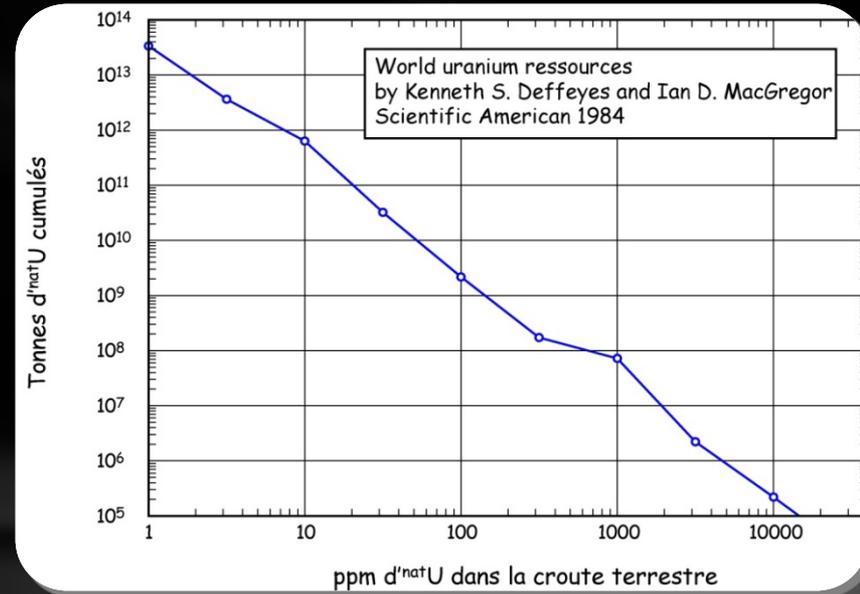
- **Le coût du MWh produit ne doit pas (trop) excéder celui d'un réacteur actuel**
- **La probabilité de perdre le réacteur doit être la plus faible possible**

Acceptabilité sociale

- **L'ensemble des critères précédents doivent être facilement explicables à un public de non spécialistes**
- **Toute décision doit être réversible (laisser aux générations futures le choix de faire autrement)**

Quelles sont les ressources en Uranium naturel ?

- Les ressources actuellement identifiées sont de 6 millions de tonnes
 - La demande est restée très basse pendant 10 à 20 ans parce qu'il fallait épuiser les stocks militaires
 - Il n'y a donc eu aucun effort de prospection
 - Le prix de l'Uranium a un impact très faible sur le coût du kWh produit
- L'uranium est un minerai
 - Son coût d'exploitation est inversement proportionnel à sa concentration dans le minerai
 - À 300 ppm, les ressources seraient de 200 millions de tonnes
 - Les estimations récentes des ressources accessibles vont de 20 à 50 millions de tonnes
- Le temps caractéristique de mise en place d'une exploitation minière est de 10 à 15 ans
 - On s'intéresse à des scénarios de déploiement du nucléaire sur plus de 40 ans
 - Ça laisse du temps aux exploitations minières pour se développer



Une exploitation minière n'est, toutefois, pas anodine sur l'environnement !

Ces ressources peuvent suffire pendant combien de temps ?

Il faut se donner un scénario de déploiement du nucléaire

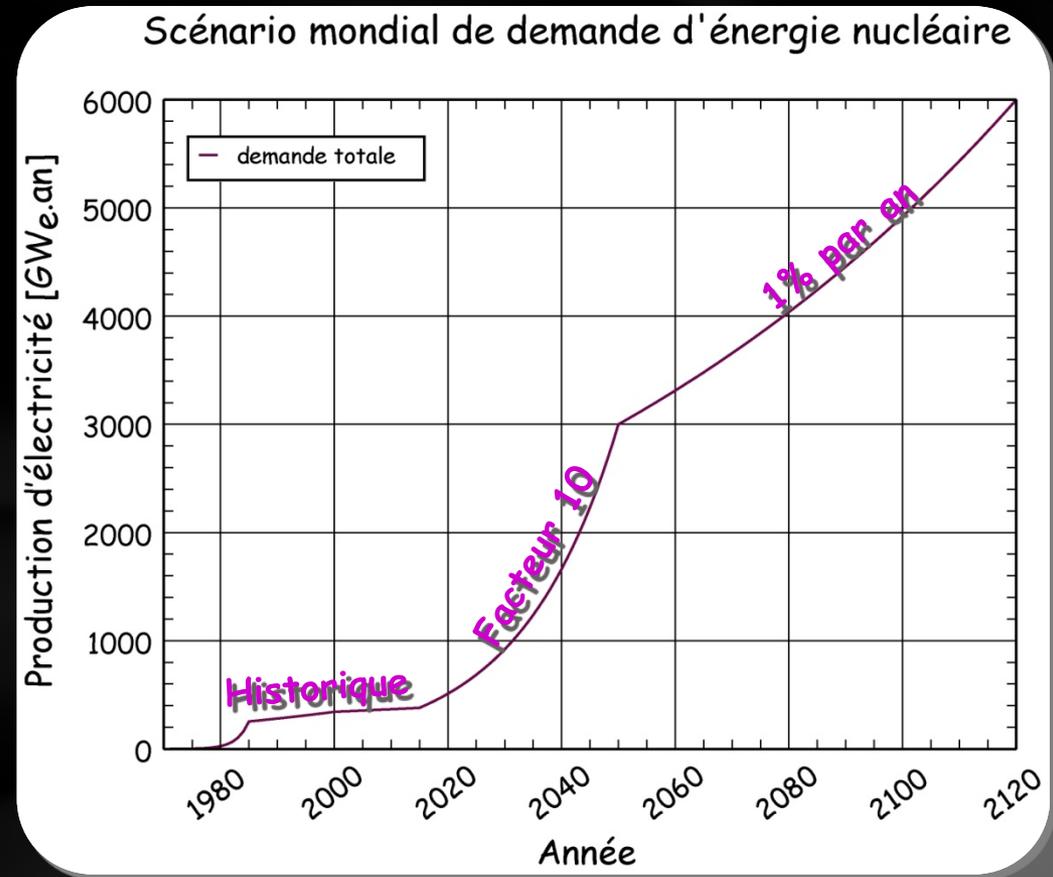
- Si on veut que le nucléaire joue un vrai rôle dans la lutte contre le changement climatique, il faut qu'il se déploie d'un facteur 10 d'ici 2050
 - Il faut ensuite s'assurer que les ressources suffisent pour les générations futures

Ce scénario est-il réaliste ?

- La France a installé $60 \text{ GW}_{\text{él}}$ pour 60 millions d'habitants en 20 ans
 - On parle ici d'installer $3000 \text{ GW}_{\text{él}}$ pour 6 milliards d'individus en 40 ans
 - C'est 2 fois moins par habitant en 2 fois plus de temps
 - Ce scénario n'est donc pas aussi intensif qu'il n'y paraît

Il faut économiser les ressources

- Actuellement l'Uranium appauvri contient encore 0,25% d' ^{235}U
 - On peut aller jusqu'à 0,1%
- L'Uranium de retraitement contient de l'ordre de 1% d' ^{235}U
 - Il faut le réenrichir



Ces ressources peuvent suffire pendant combien de temps ?

Il faut se donner un scénario de déploiement du nucléaire

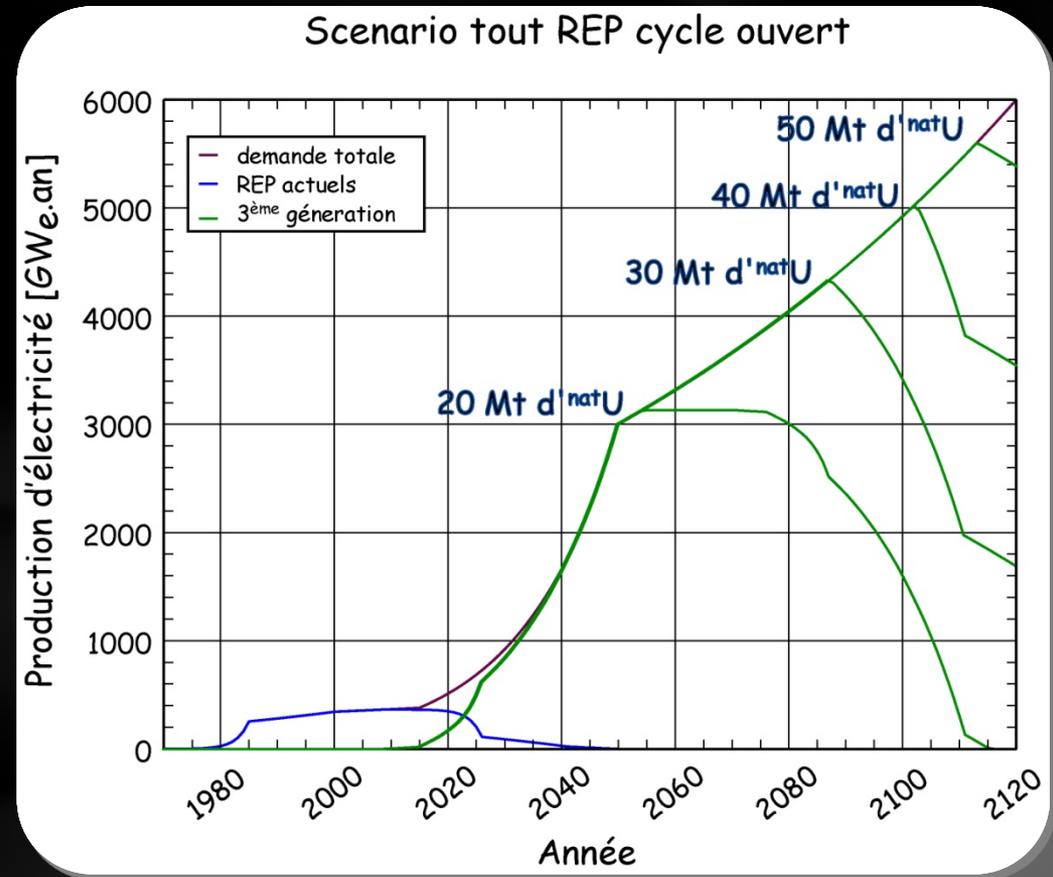
- Si on veut que le nucléaire joue un vrai rôle dans la lutte contre le changement climatique, il faut qu'il se déploie d'un facteur 10 d'ici 2050
 - Il faut ensuite s'assurer que les ressources suffisent pour les générations futures

Ce scénario est-il réaliste ?

- La France a installé $60 \text{ GW}_{\text{él}}$ pour 60 millions d'habitants en 20 ans
 - On parle ici d'installer $3000 \text{ GW}_{\text{él}}$ pour 6 milliards d'individus en 40 ans
 - C'est 2 fois moins par habitant en 2 fois plus de temps
 - Ce scénario n'est donc pas aussi intensif qu'il n'y paraît

Il faut économiser les ressources

- Actuellement l'Uranium appauvri contient encore 0,25% d' ^{235}U
 - On peut aller jusqu'à 0,1%
- L'Uranium de retraitement contient de l'ordre de 1% d' ^{235}U
 - Il faut le réenrichir
- Le Plutonium est une matière valorisable
 - Il faut le multirecycler sous forme de MOx



Ces ressources peuvent suffire pendant combien de temps ?

Il faut se donner un scénario de déploiement du nucléaire

- Si on veut que le nucléaire joue un vrai rôle dans la lutte contre le changement climatique, il faut qu'il se déploie d'un facteur 10 d'ici 2050
 - Il faut ensuite s'assurer que les ressources suffisent pour les générations futures

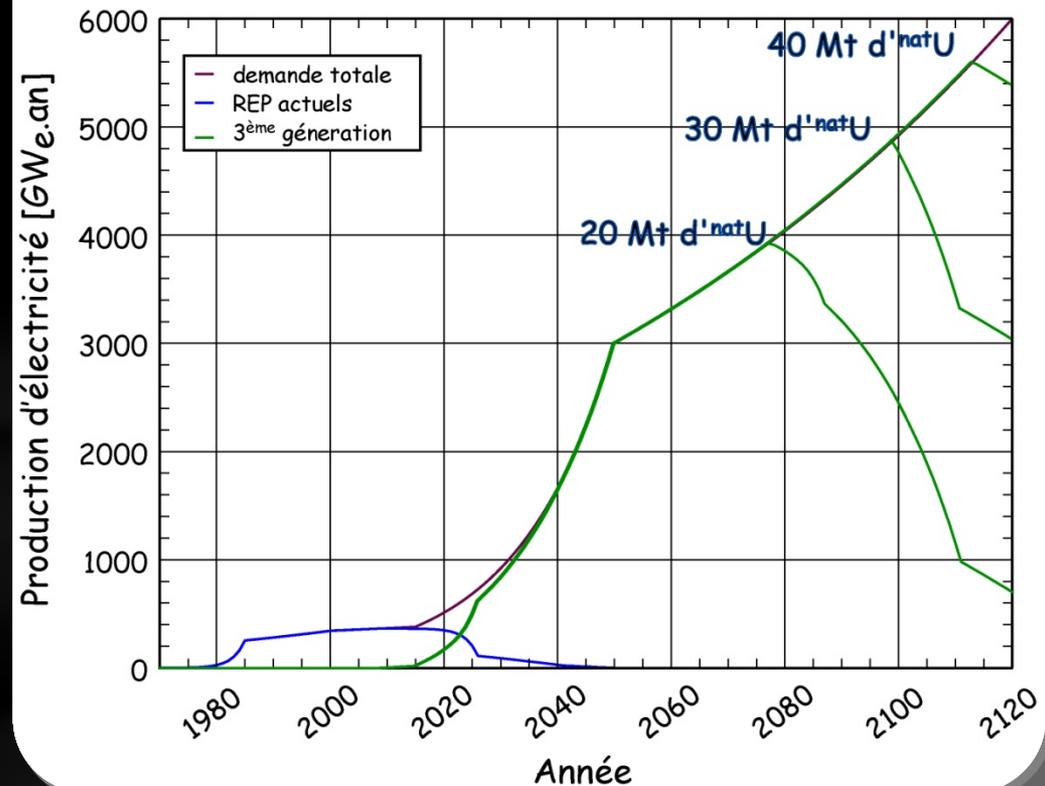
Ce scénario est-il réaliste ?

- La France a installé 60 GW_{él} pour 60 millions d'habitants en 20 ans
 - On parle ici d'installer 3000 GW_{él} pour 6 milliards d'individus en 40 ans
 - C'est 2 fois moins par habitant en 2 fois plus de temps
 - Ce scénario n'est donc pas aussi intensif qu'il n'y paraît

Il faut économiser les ressources

- Actuellement l'Uranium appauvri contient encore 0,25% d'²³⁵U
 - On peut aller jusqu'à 0,1%
- L'Uranium de retraitement contient de l'ordre de 1% d'²³⁵U
 - Il faut le réenrichir
- Le Plutonium est une matière valorisable
 - Il faut le multirecycliser sous forme de MOx

Scénario tout REP multirecyclage du Pu



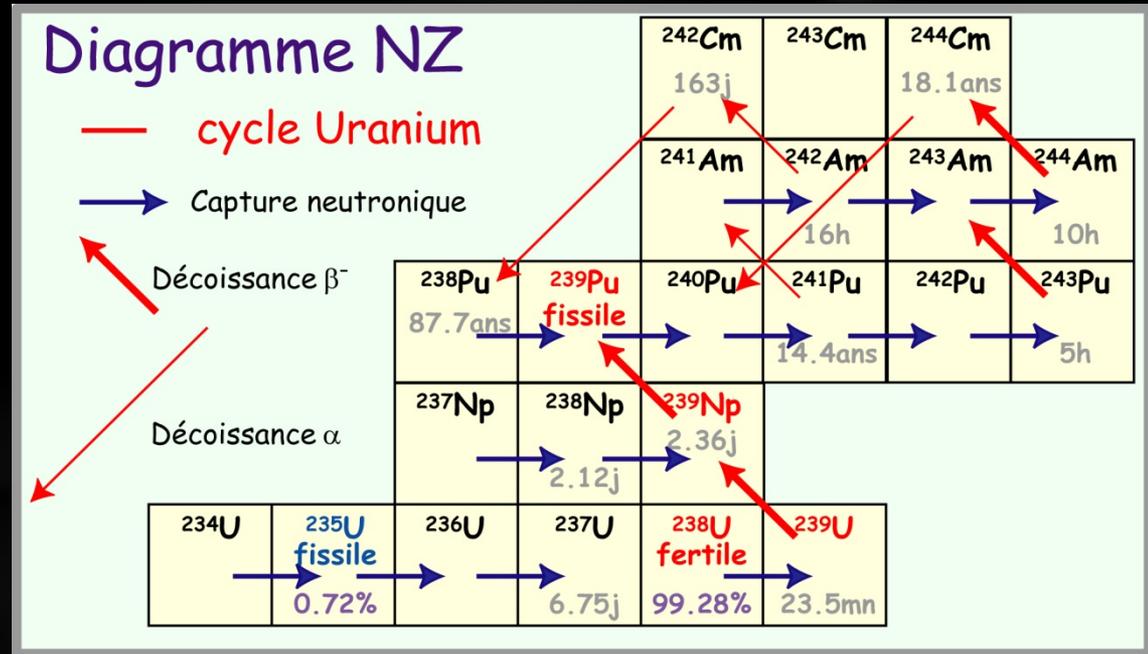
Les ressources en Uranium semblent suffisantes pour vivre avec les réacteurs actuels jusqu'à la fin du siècle

- Sans multirecyclage du Plutonium on accumule
 - 45 000 tonnes de Plutonium
 - 5 700 tonnes d'actinides mineurs (Np, Am, Cm)
- Avec le multirecyclage du Plutonium on accumule
 - 4 000 tonnes de Plutonium
 - 13 000 tonnes d'actinides mineurs

Il faudra bien envisager des solutions permettant de gérer ces transuraniens !

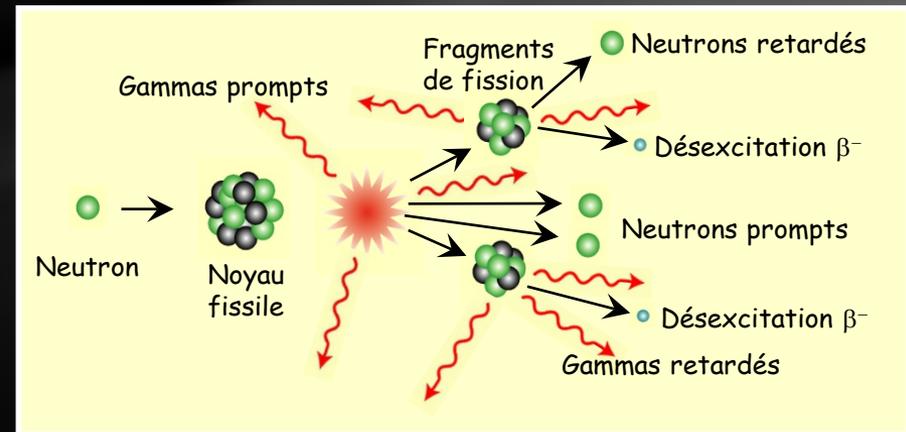
Les déchets radioactifs

Les captures neutroniques et les décroissances font apparaître des noyaux radioactifs



- **Les transuraniens**
 - Neptunium
 - ^{237}Np : 2 144 000 ans
 - Plutonium
 - ^{238}Pu : 87,7 ans
 - ^{239}Pu : 24 110 ans
 - ^{240}Pu : 6 561 ans
 - ^{241}Pu : 14,29 ans
 - ^{242}Pu : 375 000 ans
 - Américium
 - ^{241}Am : 432,2 ans
 - $^{242\text{m}}\text{Am}$: 141 ans
 - ^{243}Am : 7370 ans
 - Curium
 - ^{244}Cm : 18.1 ans
 - ^{245}Cm : 8500 ans
 - ^{246}Cm : 4760 ans
 - ^{247}Cm : 15 600 000 ans
 - ^{248}Cm : 348 000 ans

- **Les produits de fission**
 - À vie moyenne
 - ^{85}Kr : 10,7 ans
 - ^{90}Sr : 28,9 ans
 - ^{137}Cs : 30,03 ans
 - À vie longue
 - ^{79}Se : 295 000 ans
 - ^{93}Zr : 1 530 000 ans
 - ^{99}Tc : 211 100 ans
 - ^{129}I : 15 700 000 ans
 - ^{135}Cs : 2 300 000 ans



- **Auxquels il faut ajouter les produits d'activation comme :**
 - ^{36}Cl : 301 000 ans
 - ^{94}Nb : 20 300 ans

La régénération du combustible

La réaction en chaîne utilise 1 neutron sur les 2 à 3 produits par chaque fission

- Le but est d'utiliser les autres neutrons pour régénérer les noyaux fissiles au fur et à mesure qu'ils sont consommés

- Il n'y a que deux façons de le faire

- Le cycle U-Pu

- Possible uniquement avec des neutrons rapides

- Le cycle Th-U

- Possible quelle que soit l'énergie des neutrons

Cette régénération demande de recycler le combustible à chaque rechargement du cœur

- Les transuraniens sont alors réinjectés dans le cœur jusqu'à ce qu'ils fissionnent

- Les seuls déchets fortement actifs de ces réacteurs sont alors les produits de fission

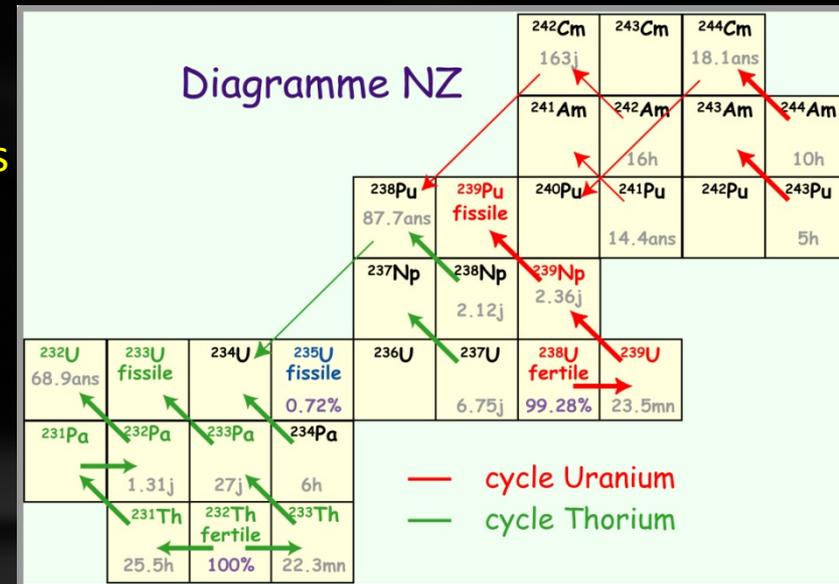
Le prix à payer est une augmentation importante du transport de matière radioactive

- Sauf si le retraitement du combustible a lieu sur place

La régénération permet de gagner sur deux tableaux

- Un gain de plus de 2 ordres de grandeurs sur les ressources naturelles

- La quasi-disparition des actinides dans les déchets produits



Superphénix était un réacteur régénérateur en cycle U-Pu

Le cycle U-Pu n'est envisagé qu'en combustible solide

- Il faut, à chaque retraitement
 - Détruire le combustible
 - Réaliser le retraitement
 - Refabriquer le combustible

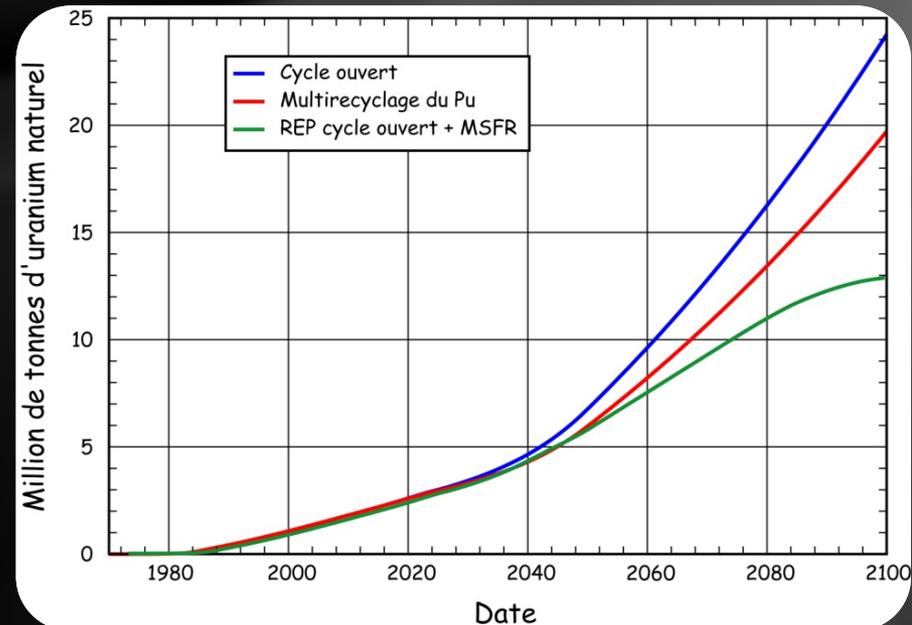
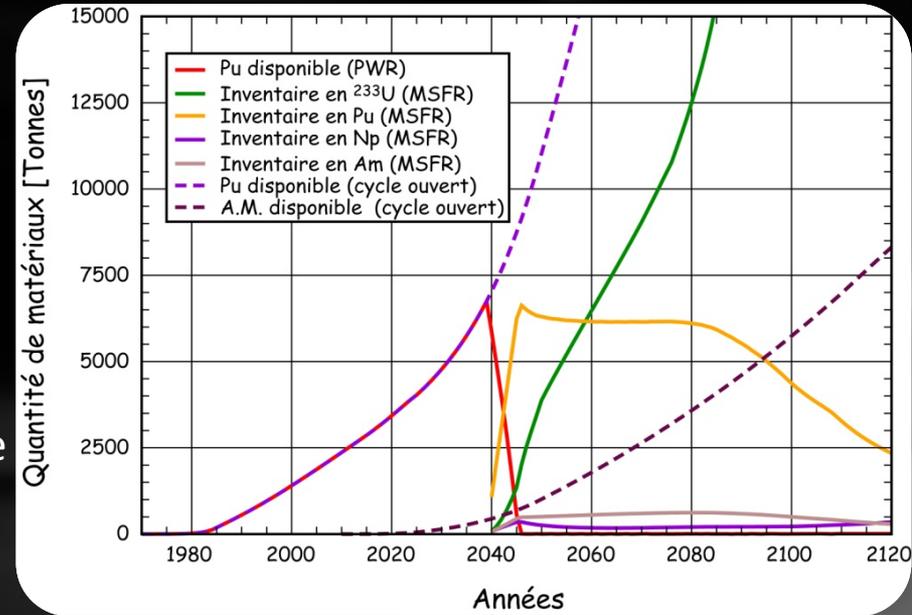
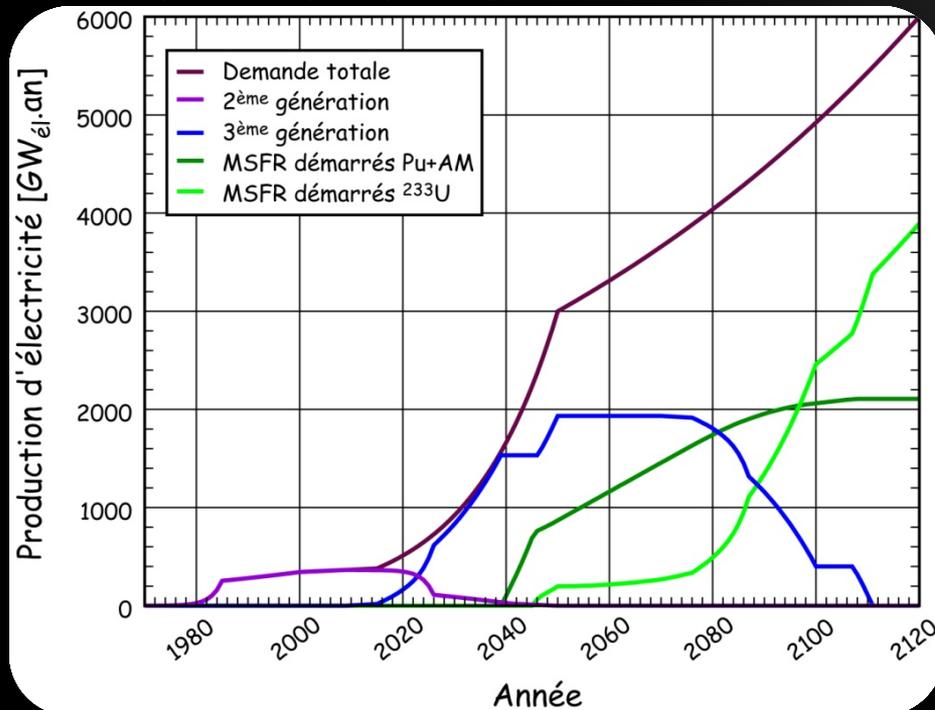
Le cycle Th-U peut être très efficace en combustible liquide

- Le retraitement est alors facilité et peut être réalisé sur place sans un surcoût important

Si on met en place la régénération à partir de 2040

Exemple avec le cycle Thorium

- Les réacteurs surgénérateurs permettent de limiter le nombre de réacteurs de 3^{ème} génération
- La production de transuraniens est fortement réduite
 - En cycle Thorium il y a même une forte diminution des stocks de Plutonium
- La consommation d'Uranium naturel est limitée à 13 millions de tonnes
 - Pas plus de quelques kg par personne en un siècle !



Compétitivité des réacteurs régénérateurs

Le prix de revient du kWh des réacteurs actuels dépend du coût de l'uranium naturel (^{nat}U)

- Celui-ci peut varier de 100 \$/kg (prix actuel) à plus de 1000 \$/kg

Celui des réacteurs régénérateurs n'en dépend quasiment pas, mais ils sont plus chers à la construction

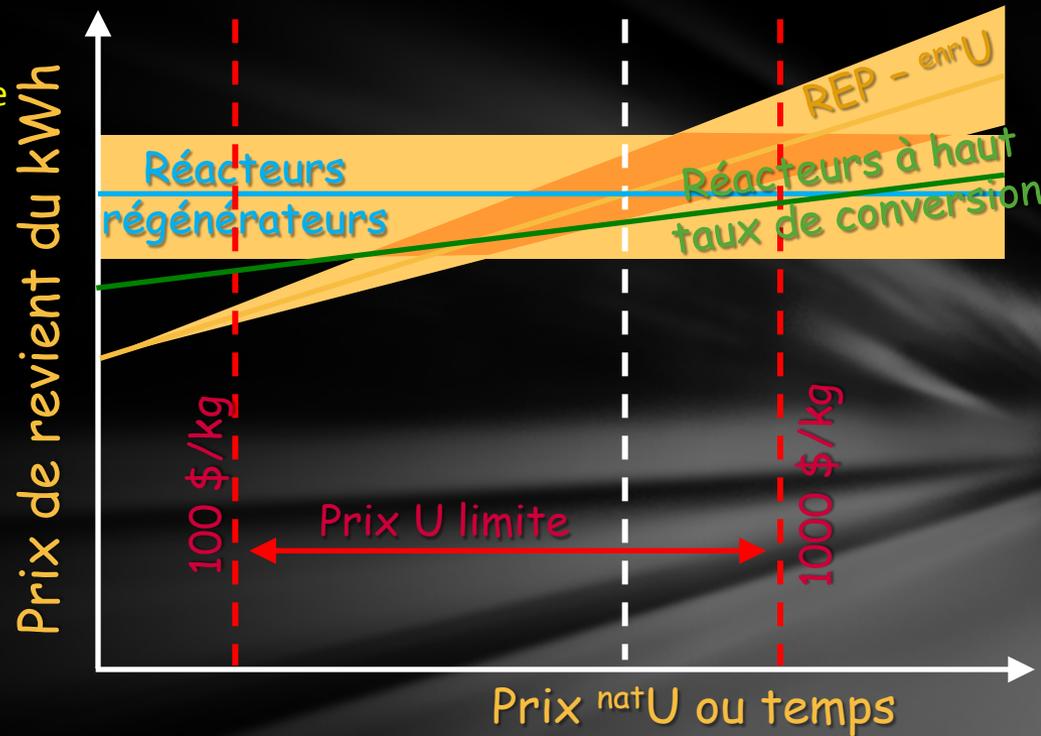
- Les réacteurs régénérateurs deviennent compétitifs au-delà d'un certain prix pour l'^{nat}U

Les réacteurs à haut taux de conversion ont un comportement intermédiaire

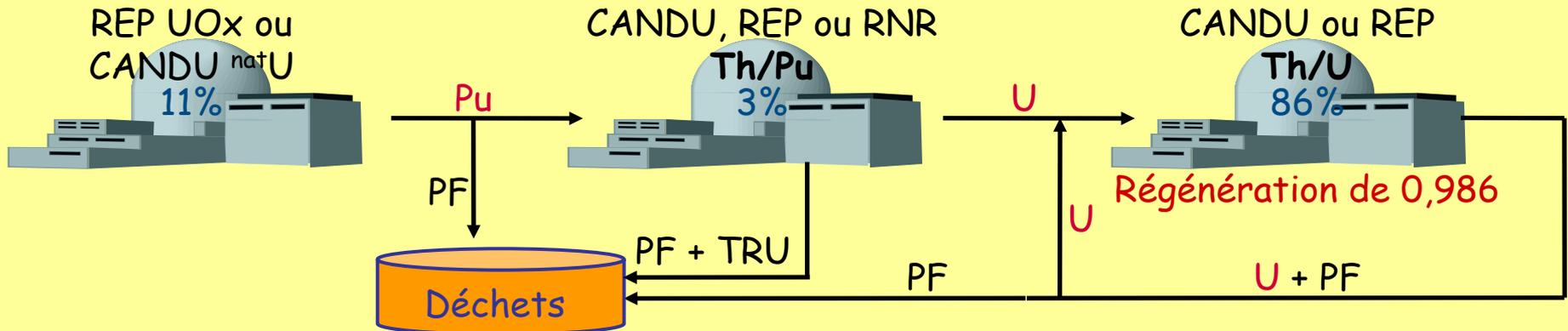
- Ce sont des réacteurs à eau configurer pour mieux utiliser les ressources naturelles
 - En général ils utilisent du thorium

- Ils pourraient retarder la transition entre les réacteurs actuels et ceux de 4^{ème} génération grâce à des parcs symbiotiques

- À la limite, les réacteurs de 4^{ème} génération pourraient ne jamais être économiquement rentables par rapport à ces réacteurs à haut taux de conversion



Mais il y a beaucoup d'incertitudes sur ces aspects économiques



Quels sont les avantages du cycle thorium ?

Le cycle thorium est la seule alternative au cycle uranium, il présente a priori trois avantages sur ce dernier :

- **Faible production de transuraniens (TRU)**
 - Il faut 6 captures neutroniques supplémentaires pour produire ces TRU
- **Possibilité d'être régénératif en spectre thermique**
 - Le nombre de neutrons disponibles après l'entretien de la réaction en chaîne et la régénération de l' ^{233}U est positif quelque soit l'énergie des neutrons
- **Forte résistance à la prolifération grâce à la décroissance de l' ^{232}U qui est presque toujours associé à l' ^{233}U**
 - En fin de chaîne de décroissance de cet ^{232}U il y a émission d'un gamma très énergétique dont il est difficile de se protéger
 - Ce gamma sert aussi de traceur pour détecter un transport illicite d' ^{233}U

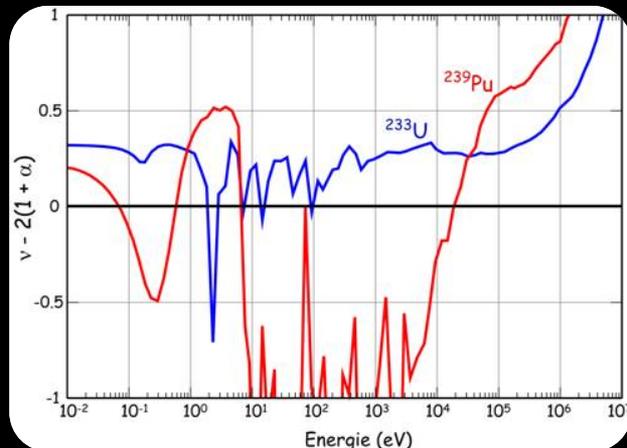
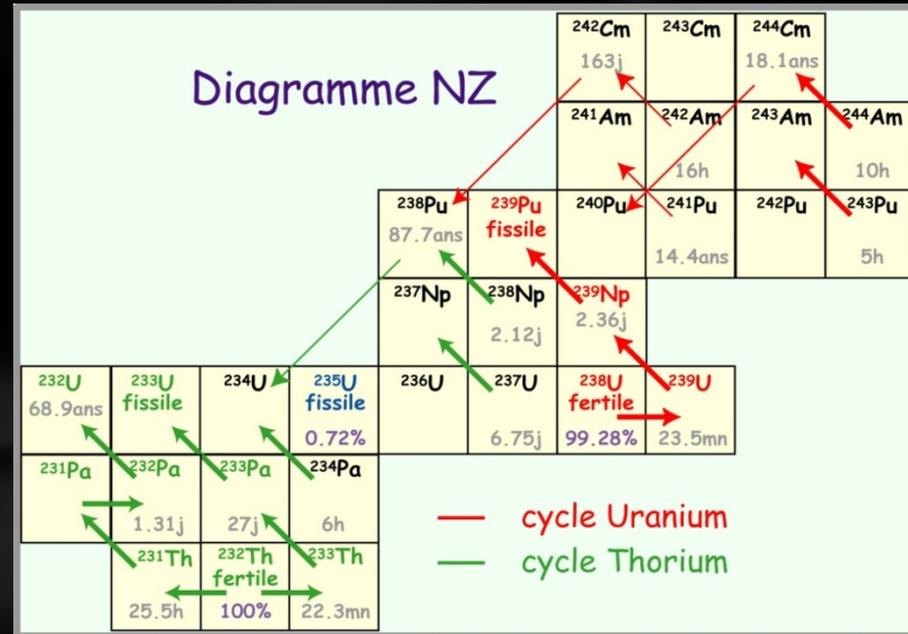
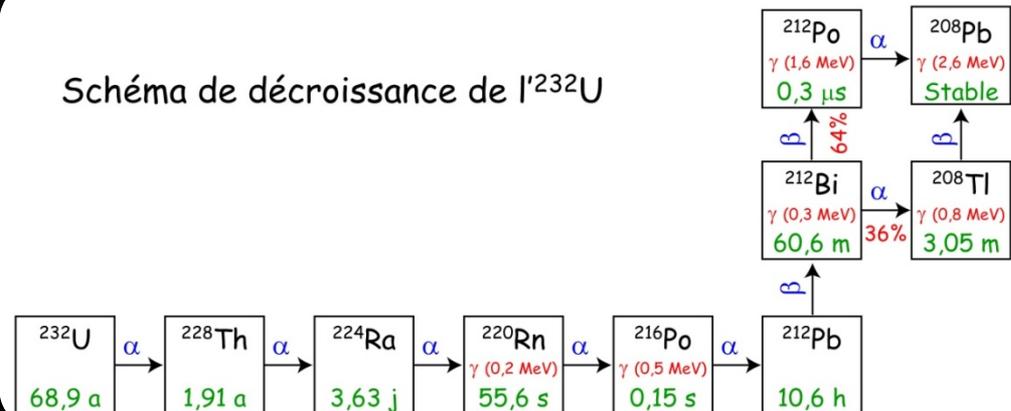


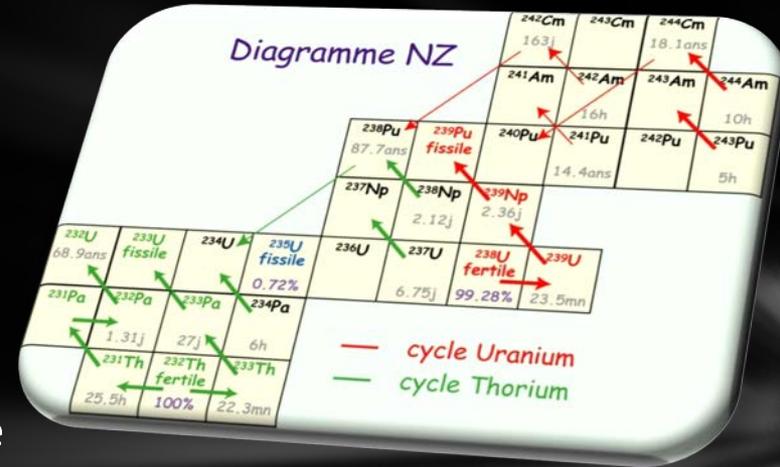
Schéma de décroissance de l' ^{232}U



Que nous apporte ces avantages par rapport au cycle U/Pu ?

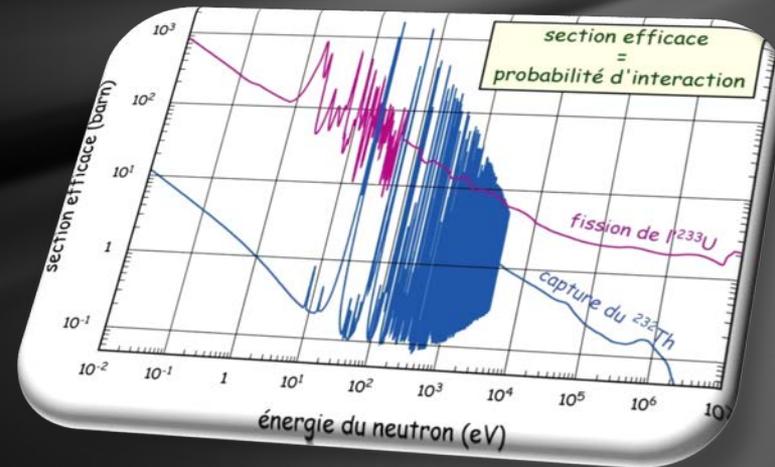
Faible production de transuraniens (TRU)

- Il y a tout de même production de ^{231}Pa (32 760 ans)
- Dans un cycle régénérateur les actinides devraient être multi-recyclés
 - En produire plus ou moins ne concerne que les rejets au retraitement qui sont très faibles
 - il faut tout de même s'interroger sur l'inventaire final lors de l'arrêt de la filière



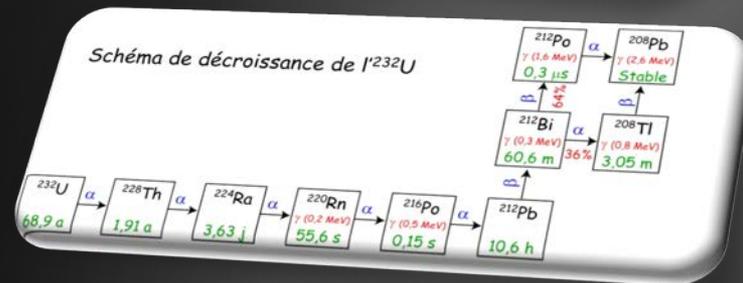
Possibilité d'être régénérateur en spectre thermique

- Les sections efficaces de capture neutronique sont très élevées en spectre thermique, ce qui entraîne une forte sensibilité à l'empoisonnement dû aux produits de fission
 - Il faut alors accélérer le retraitement et donc augmenter les rejets au retraitement
- De même, la production de transuraniens est augmentée par ces sections efficaces plus fortes
 - Mais l'inventaire en matière fissile est plus faible



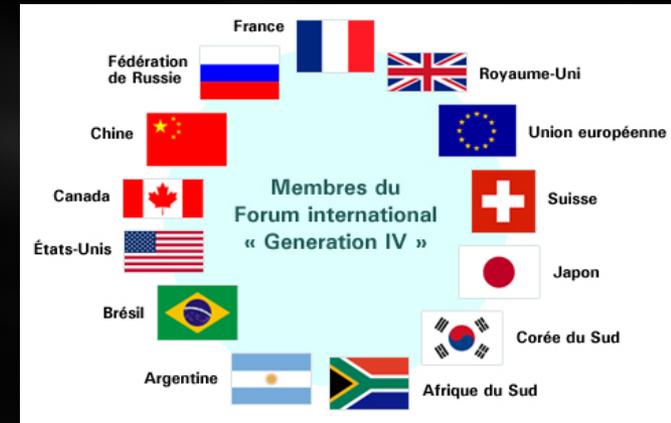
Forte résistance à la prolifération grâce à la décroissance de ^{232}U qui est presque toujours produit avec ^{233}U

- Cet ^{232}U devient un inconvénient lors du retraitement du combustible
 - Cet inconvénient est plus facilement maîtrisable en combustible liquide



Les réacteurs de 4^{ème} génération

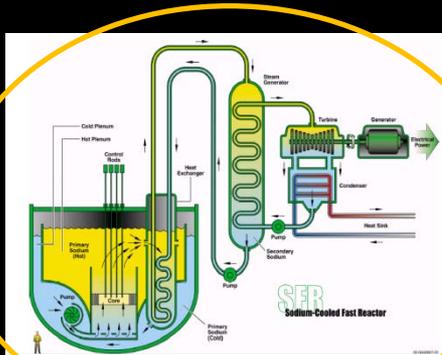
Un forum international (GIF) a été créé en 2000 à l'initiative des États-Unis pour définir les réacteurs de 4^{ème} génération



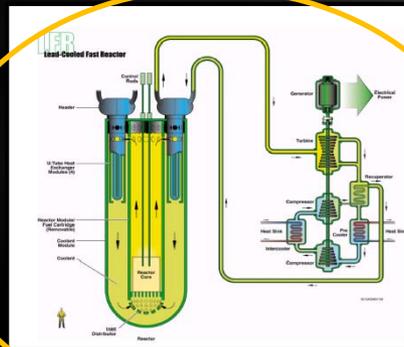
Les critères retenus sont :

- Économiser les ressources naturelles
- Améliorer encore la sûreté
- Minimiser la production de déchets
- Réduire les risques de prolifération
- Réacteurs économiquement rentables

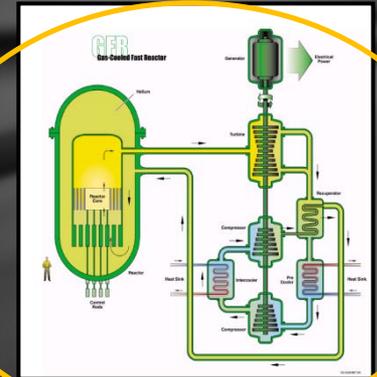
6 concepts ont été retenus



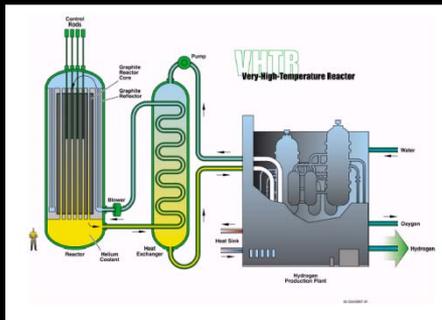
Réacteur rapide au Sodium



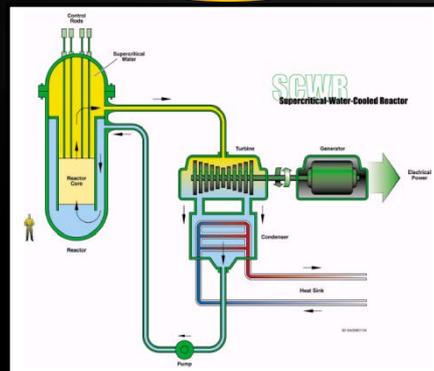
Réacteur rapide au Plomb



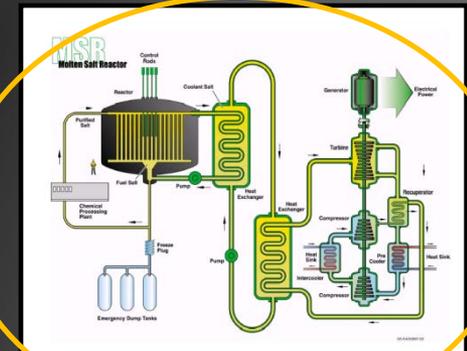
Réacteur rapide à gaz



Réacteur à gaz, Très Haute Température



Réacteur à eau supercritique

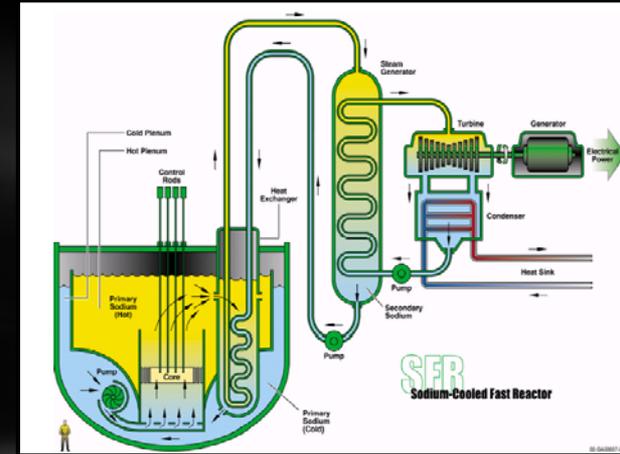


Réacteur à sels fondus

Les réacteurs rapides caloportés sodium (RNR-Na ou SFR)

C'est celui qui a le plus de retour d'expérience

- **En France: Rapsodie, Phénix et superphénix**
- **Mais aussi en Russie, Japon, USA, Allemagne et Royaume Uni**
 - Actuellement il y a 2 réacteurs en service
 - BN600 Russe qui fonction à l'uranium enrichi
 - CEFR Chine de 25 MW_{él}
 - Un est en arrêt prolongé (Monju280 au Japon)
 - 2 sont en construction (PFBR500 Inde, BN800 Russie)
 - Au moins 3 sont en projet : ASTRID, BN1200 et CPFR (600 MW_{él} Chine)



Ce type de réacteur pose toutefois de gros problèmes technologiques

- **Le sodium s'enflamme au contact de l'air ou de l'eau**
 - Les incendies sodium sont maîtrisables
- **Le coefficient de vide d'un réacteur de puissance est positif ce qui peut entraîner un accident de réactivité**
 - Pour résoudre ce problème, le cœur doit être complexe et la densité de puissance réduite (cœur à faible coefficient de vidange breveté par le CEA)
 - L'inventaire en matière fissile est alors très important
 - Une autre solution consiste à utiliser le cycle Th-U à la place du cycle U-Pu
 - Le cycle Th-U est mal maîtrisé en combustible solide
- **La régénération est obtenue grâce à une couverture fertile très proliférante en cycle U-Pu**
 - Une option consiste à inclure des AM dans la couverture fertile pour la rendre impropre à la production de bombes
 - Une autre solution pourrait être d'utiliser une couverture fertile au thorium qui n'est pas proliférante du fait de la présence d'²³²U

ASTRID : "Advanced Sodium Technology Reactor for Industrial Demonstration"

Jacques Chirac, le 5 janvier 2006 :

« De nombreux pays travaillent sur la nouvelle génération de réacteur, celle des années 2030-2040, qui produira moins de déchets et exploitera mieux les matières fissiles.

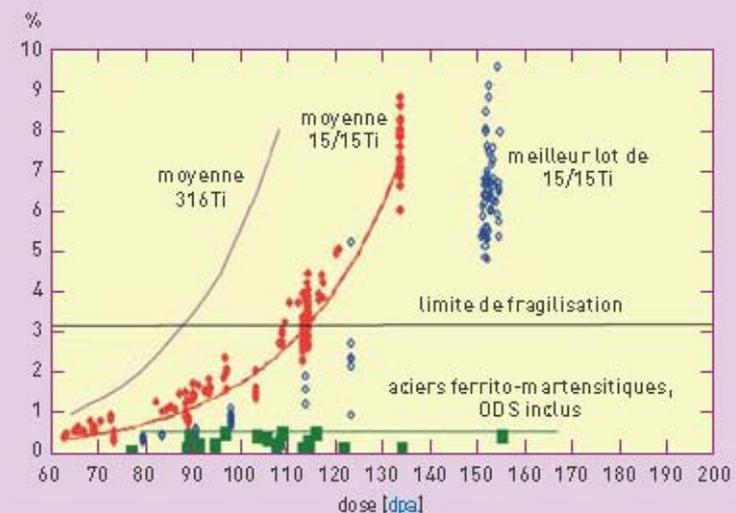
J'ai décidé de lancer dès maintenant la conception au sein du Commissariat à l'énergie atomique d'un prototype de réacteur de quatrième génération qui devra entrer en service en 2020. »

Le délai très court ne laisse pas de choix sur la technologie

- Ce sera un RNR-Na de 600 MW_{él}

Les buts sont

- **Améliorer la compétitivité économique**
 - Réduire les coût d'investissement
 - Faciliter l'inspection en service
- **Améliorer la sûreté**
 - Minimiser les risques dus au sodium
 - Gérer les situations accidentelles
- **Expérimenter le recyclage et la transmutation des actinides mineurs**
- **Expérimenter des matériaux de type ODS**
 - Les gaines de combustible devront supporter jusqu'à 200 dpa (Déplacement Par Atome)



Déploiement des RNR-Na

Les capacités de déploiement vont dépendre des inventaires initiaux en matière fissile et des quantités surgénérées

- L'inventaire d'un RNR-Na va de 6 tonnes (Superphénix) à plus de 12 tonnes pour assurer un coefficient de vide négatif
- Le quantité surgénérée peut être nulle si il n'y a pas de couverture fertile et peut atteindre plusieurs centaines de kg dans le cas contraire

Le plutonium est produit dans des réacteurs à eau qui consomment de l'uranium naturel

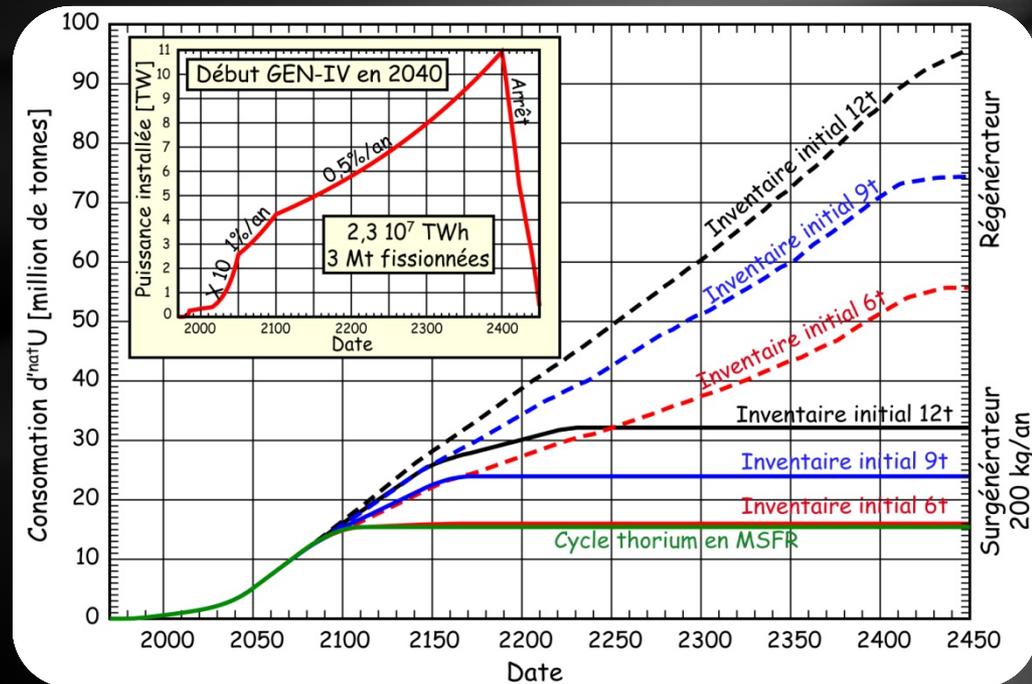
- La limite de déploiement dépend des ressources en uranium naturel
 - Mais aussi du moment et du rythme de la demande
- Elle dépend aussi du profil de demande
 - Le cas le plus difficile est une demande constamment croissante même faiblement

Malgré les médiocres capacités de déploiement du RNR-Na (12t, juste régénérateur) les ressources naturelles semblent suffisantes pour très longtemps

Dans tous les cas on accumule une grande quantité d'uranium appauvri et de retraitement

Un réacteur en combustible solide a besoin de 2 inventaires pour fonctionner

- Le premier est chargé au démarrage
 - Il restera en cœur environ 5 ans (temps d'irradiation)
- Le deuxième est chargé pour permettre le retraitement du premier
 - On suppose que le temps de retraitement est identique au temps d'irradiation
 - Mais on parle plus généralement de 5 ans d'irradiation pour 7 ans de retraitement

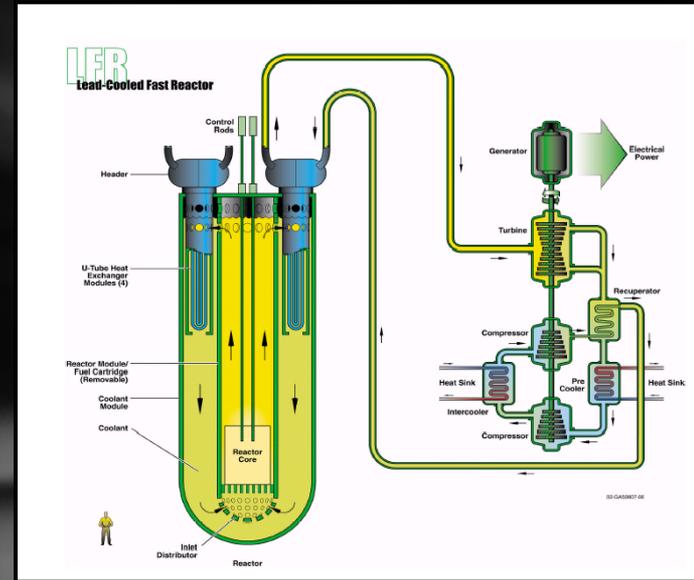


Le cycle thorium est comparable au RNR-Na le plus performant

Les réacteurs rapides caloportés plomb (LFR)

Les réacteurs de sous-marins Russes sont refroidis au plomb-bismuth

- Ça résout le problème d'inflammabilité du caloporteur
- Le coefficient de vide reste positif
- Le plomb est plus corrosif que le sodium surtout si on monte en température au-delà de 500°C
 - Il faut contrôler à 0,01 ppm près le taux d'oxygène
- Le plomb est aussi très abrasif
 - Il faut limiter la vitesse de circulation à 2 m/s



Deux projets sont développés dans le cadre du GIF

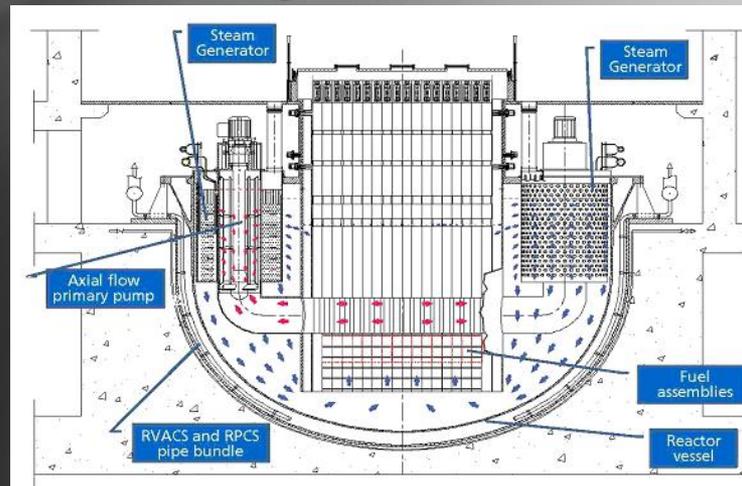
- the Small Secure Transportable Autonomous Reactor (SSTAR)
 - 20 MW_{él} en circulation naturelle

- the European Lead-cooled System (ELSY)
 - 600 MW_{él}

La Russie développe le projet BREST-1200 avec un combustible nitrure

La Belgique a en projet le réacteur sous-critique MYRRHA qui sera caloporté au plomb-bismuth

Configuration de ELSY



Les réacteurs rapide caloportés gaz (GFR)

Le gaz résout le problème du coefficient de vide

Il permet aussi d'atteindre de hautes températures (850°C)

- Cela donne accès à des applications hautes températures comme la production d'hydrogène

- Cela améliore le rendement thermodynamique

Malheureusement le gaz est un très mauvais caloporteur

- L'évacuation de la chaleur résiduelle est difficile à assurer en cas d'accident de refroidissement

- Cela impose de mettre en place une double enceinte de confinement du gaz

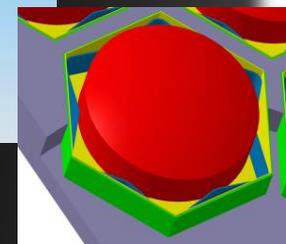
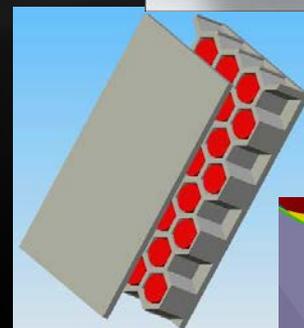
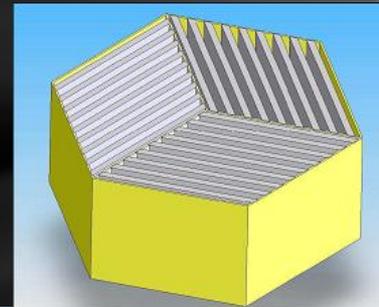
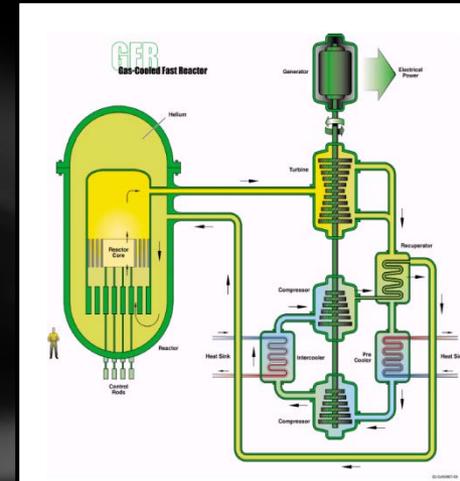
- Pour obtenir un spectre neutronique rapide il faut un combustible compact

- Les hautes températures imposent des matériaux de type SiC-fSiC qui ne sont pas étanches

- Il faut installer des liners qui eux-mêmes doivent être protégés !

- Les difficultés de refroidissement obligent à réduire fortement la puissance spécifique

- L'inventaire initial par GW_{el} est alors très important



ALLEGRO
Euratom

Le cycle thorium et les combustibles liquides

Quelles sont les contraintes sur le type de liquide ?

- Température de fusion pas trop élevée
- Température d'ébullition suffisamment élevée
- Tension de vapeur faible
- Bonnes propriétés thermiques et hydrauliques
- Stabilité du liquide sous irradiation
- Solubilité des éléments fissiles et fertiles suffisante
- Pas de production de radio-isotopes difficilement gérables
- Possibilité d'un retraitement du combustible

Au final seuls les fluorures de Lithium sont possibles

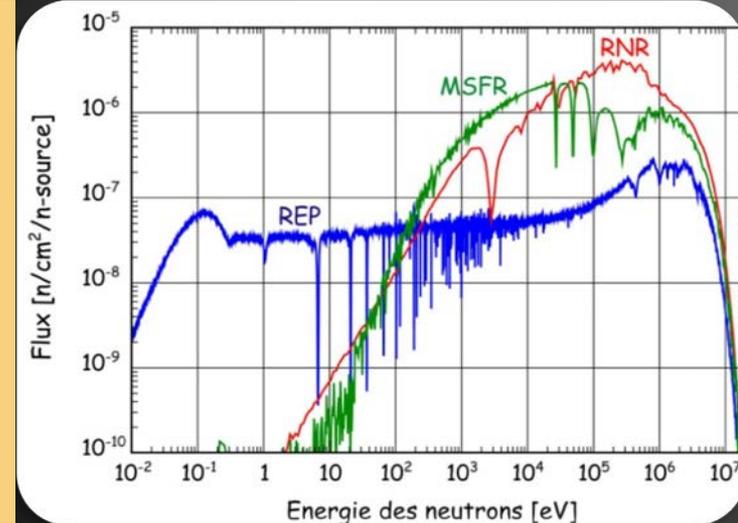
Réacteurs à sels fondus

Les propriétés neutroniques du fluor et la solubilité du Pu dans les fluorures sont défavorables au cycle uranium/plutonium

Cycle Thorium

Quels sont les avantages d'un combustible liquide ?

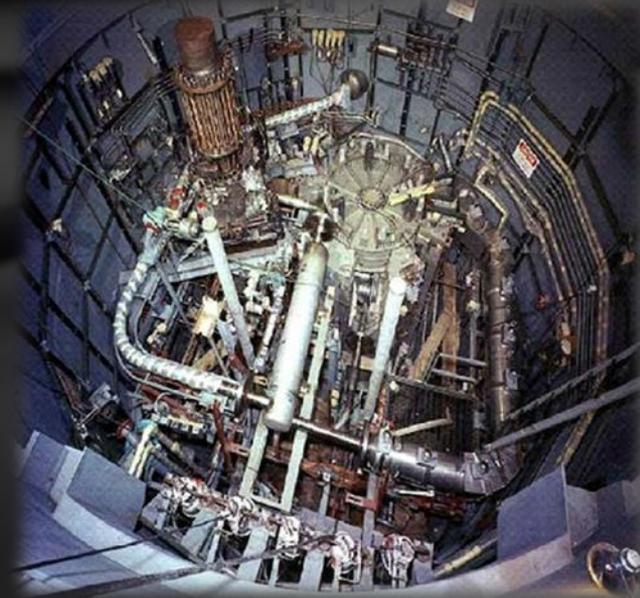
- Homogénéité du combustible (pas de plan de chargement)
- Chaleur produite directement dans le caloporteur
- Possibilité de reconfigurer le cœur en quelques minutes
 - Une première configuration permet d'optimiser la production d'énergie en gérant le risque de criticité
 - Une deuxième configuration permet un stockage avec refroidissement passif
- Possibilité de retraiter le combustible sans arrêter le réacteur
 - Pas de réserve de réactivité
 - Meilleure gestion des produits de fission neutrophages
 - Besoin d'un seul inventaire fissile initial



Rapide historique des Réacteurs à Sels Fondus (RSF)

Les projets de l'ORNL (Oak-Ridge National Laboratory)

- **L'Aircraft Reactor Experiment (ARE)**
 - Il s'agissait de concevoir un réacteur embarqué dans un avion !
 - Il a fonctionné une centaine d'heures à 2,5 MW_{th} en 1954
- **Le Molten Salt Reactor Experiment (MSRE)**
 - Démonstrateur de RSF
 - Il a fonctionné 5 ans à 8 MW_{th}
 - De 1965 à 1968 à l'Uranium enrichi à 30%
 - De 1968 à 1969 au Plutonium
 - En 1969 à l'Uranium 233
- **Le Molten Salt Breeder Reactor (MSBR)**
 - Projet de réacteur industriel en cycle Thorium de 2500 MW_{th}
 - Recherche d'une surgénération maximum
 - Arrêt du projet en 1976



Les projets sur les RSF ont ensuite repris

- **Japon depuis les années 80**
- **France (CEA, EDF) puis CNRS depuis les années 2000**
- **Russie depuis les années 90**
- **USA dans les années 90**
- **Tchéquie depuis les années 2000**
- **Chine depuis 2011**

C'est le MSBR que le forum international GEN IV a retenu parmi 6 concepts en 2002

Le CNRS et les réacteurs à sels fondus

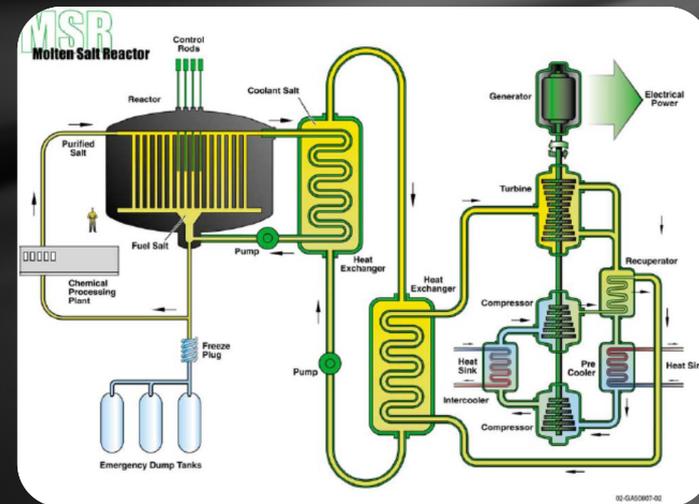
Participation au projet TIER-1 de C. Bowman (1998)

Réévaluation du MSBR de 1999 à 2002

- Réacteur producteur d'énergie en cycle Thorium
 - Utilisation de codes Monte Carlo pour la neutronique (MCNP)
 - Couplage à un code d'évolution des matériaux (REM)
 - Mise en évidence de problèmes inhérents au MSBR
 - Coefficient de contre réaction global nul, voire positif
 - Coefficient de vide positif
 - Retraitement peu réaliste ($4 \text{ m}^3/\text{j}$)
 - Présence de graphite en cœur
 - durée de vie limitée (2 à 5 ans)
 - difficultés de retraitement ou de stockage
 - risques d'incendie

Globalement le MSBR n'a pas les capacités à devenir un réacteur industriel

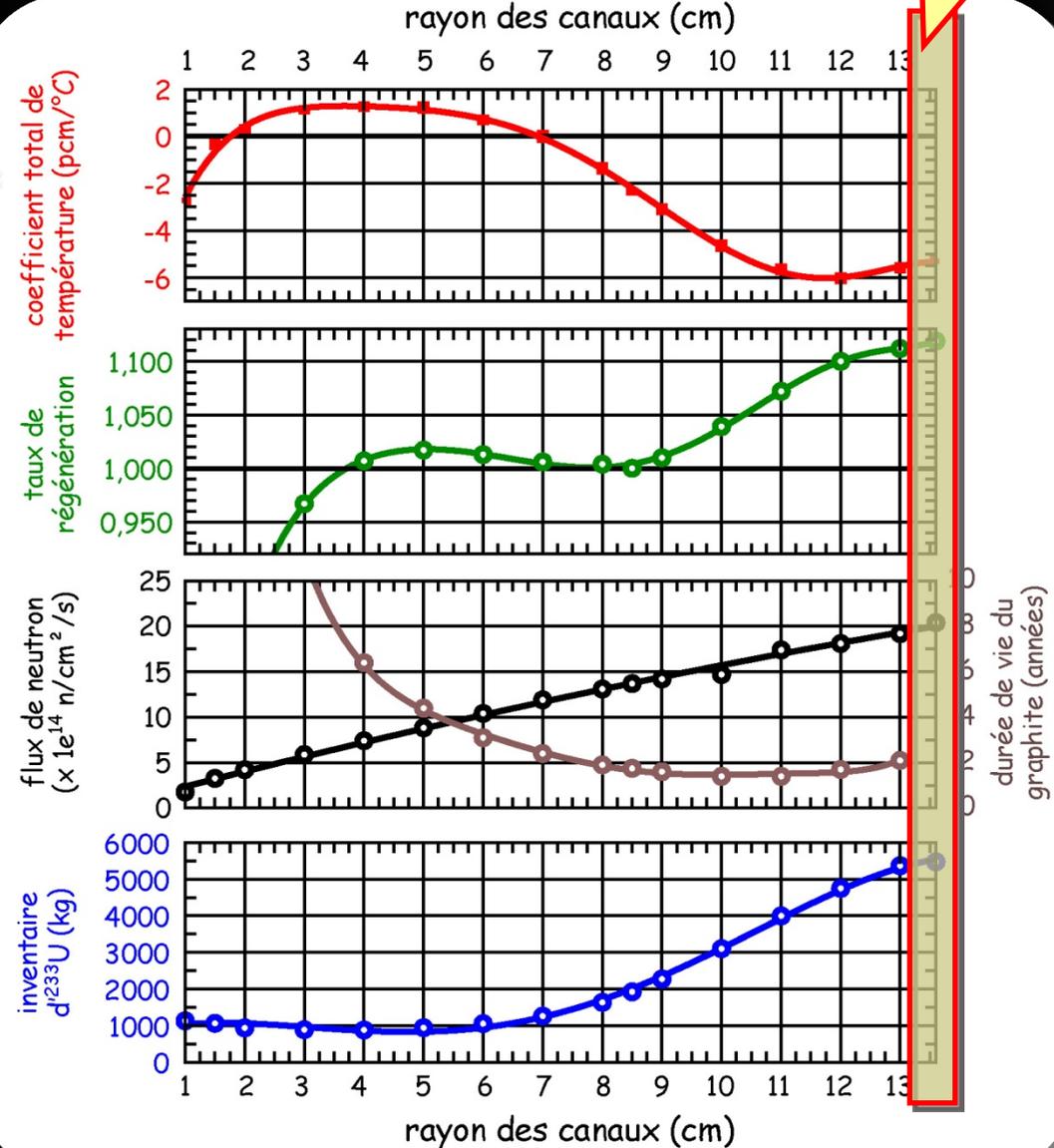
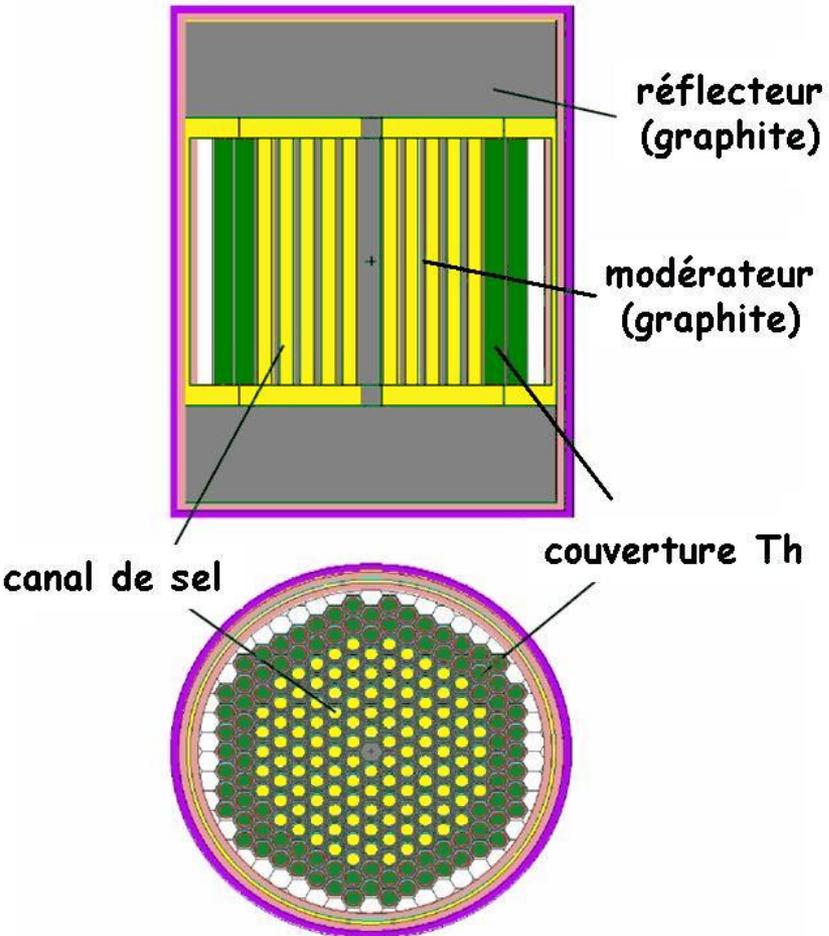
Les experts avaient conclu que ce réacteur n'était pas pertinent et ils avaient raison !



Les avantages intrinsèques d'un combustible liquide restent pourtant très attrayants

Du MSBR (Molten Salt Breeder Reactor) au MSFR (Molten Salt Fast Reactor)

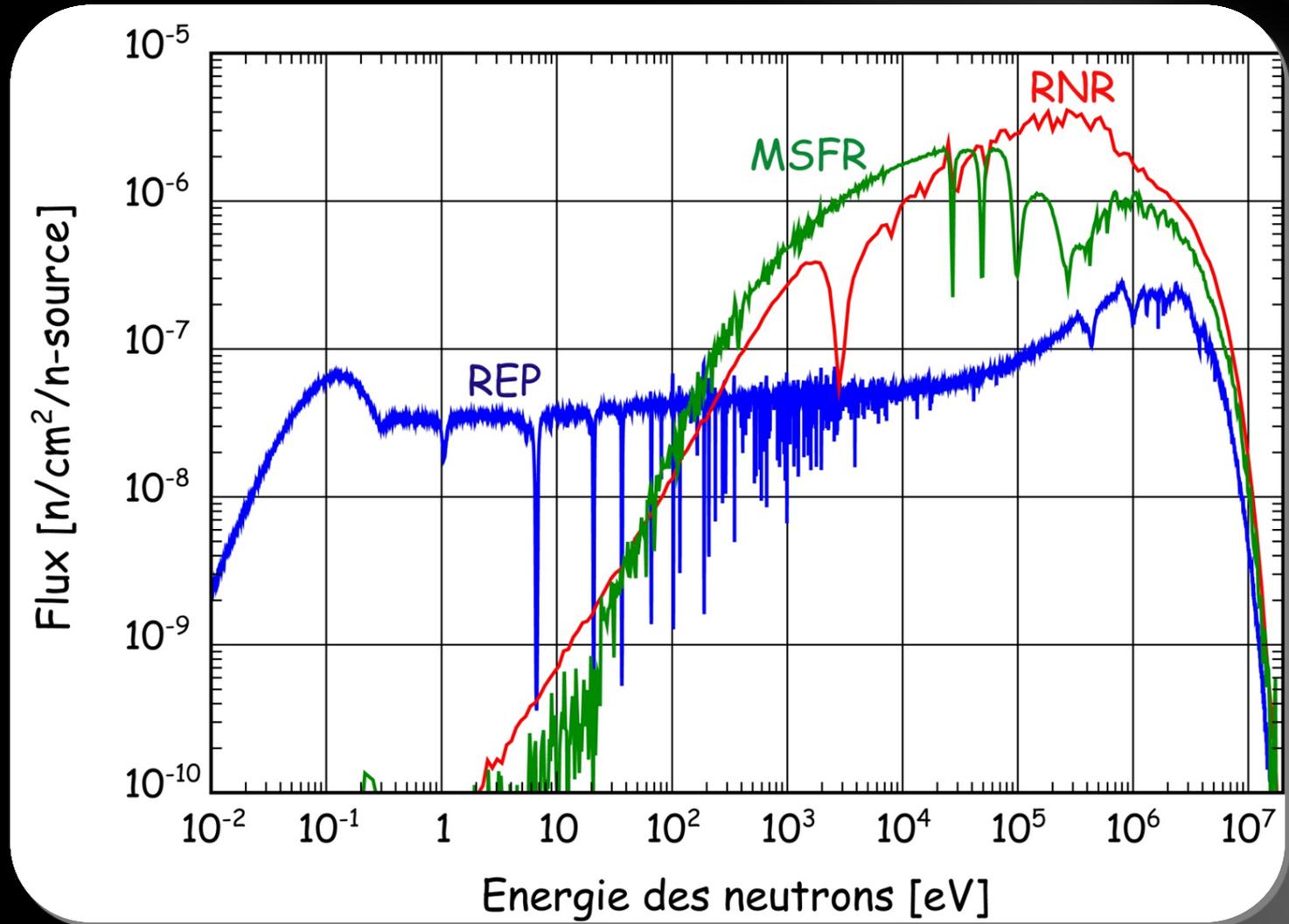
Le MSFR



Le MSFR est un réacteur régénérateur à spectre rapide

Le MSFR

Comparaison avec les spectres neutroniques REP et RNR



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} (1,3 GW_{él})

Inventaire initial d'²³³U par réacteur : 5060 kg
Inventaire initial d'²³³U par GW_{él} : 3610 kg

Volume de sel combustible : 18 m³

- 1/2 dans le cœur
- 1/2 dans les échangeurs et tuyaux

Retraitement du cœur : 10 à 40 l/j

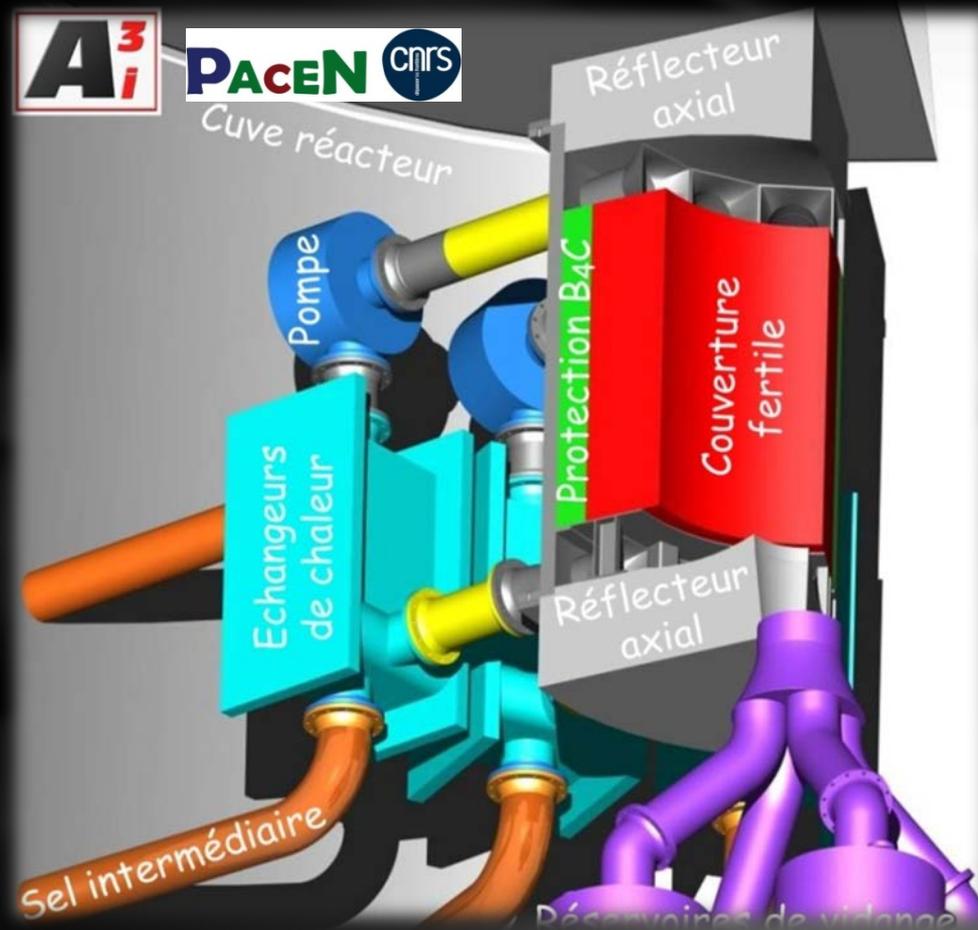
Diamètre intérieur du cœur : 2,26 m
Hauteur du cœur : 2,26 m

Epaisseur de la couverture fertile : 50 cm
Volume de la couverture : 7,3 m³
Sel de la couverture : 77,5%⁷LiF,-22,5%ThF₄
Retraitement de la couverture : 40 l/j

Coefficient de contre réaction: de -5,3 à -4,8 pcm/K

- Densité : de -3,7 à -3,3 pcm/K
- Doppler : de -1,6 à -1,5 pcm/K

Production d'²³³U : 50 à 95 kg/an
Temps de doublement : 55 à 100 ans



Le MSFR et le forum international GEN IV



Le MSFR a été nommé et sélectionné par le forum international GEN IV dans le cadre du " MSR Steering Committee "

- Ce choix a été entériné par le " policy group " en 2008
- Les aspects technologiques spécifiques doivent être investigués
- Une approche de sûreté spécifique doit être établie

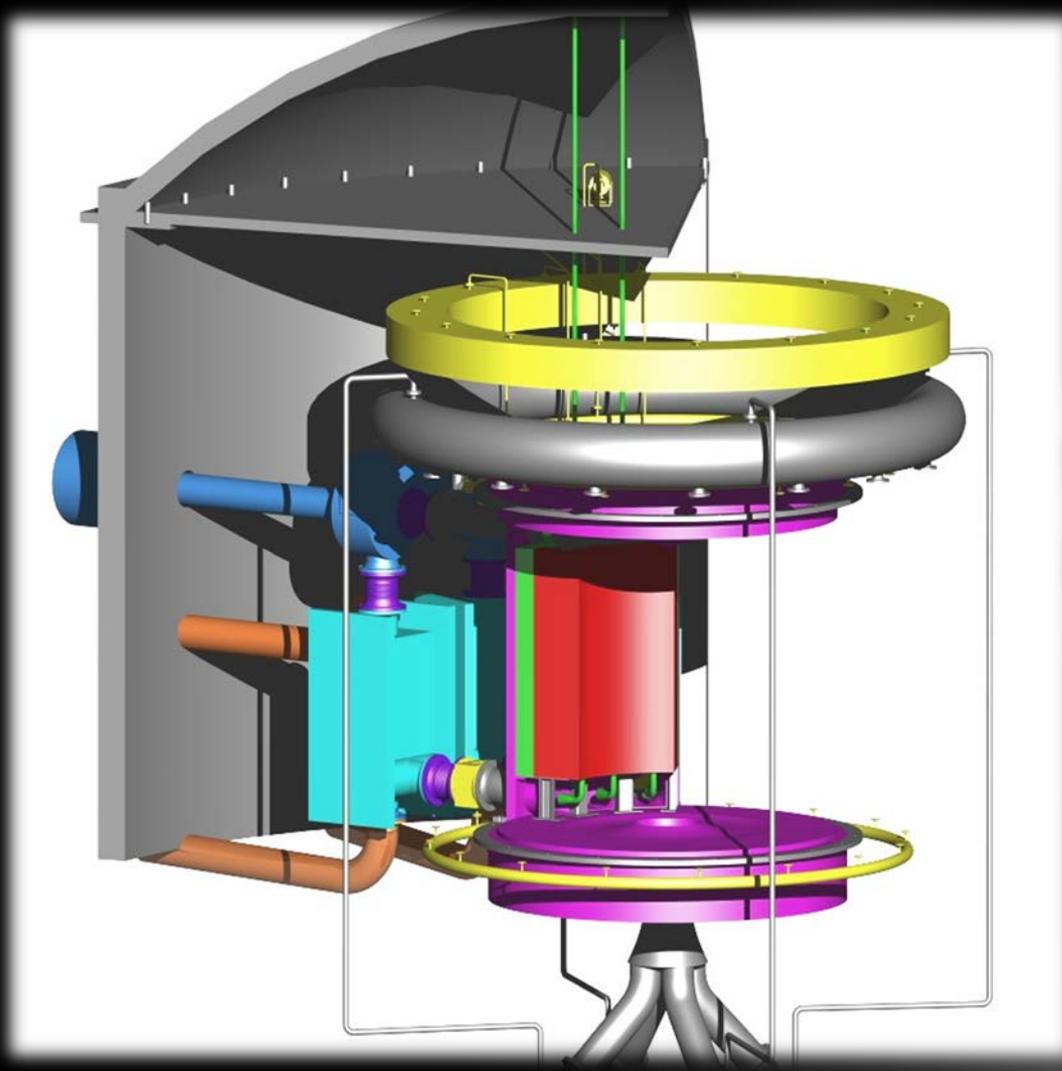
R&D objectives

The renewal and diversification of interests in molten salts have led the MSR provisional SSC to shift the R&D orientations and objectives initially promoted in the original Generation IV Roadmap issued in 2002, in order to encompass in a consistent body the different applications envisioned today for fuel and coolant salts.

Two baseline concepts are considered which have large commonalities in basic R&D areas, particularly for liquid salt technology and materials behavior (mechanical integrity, corrosion):

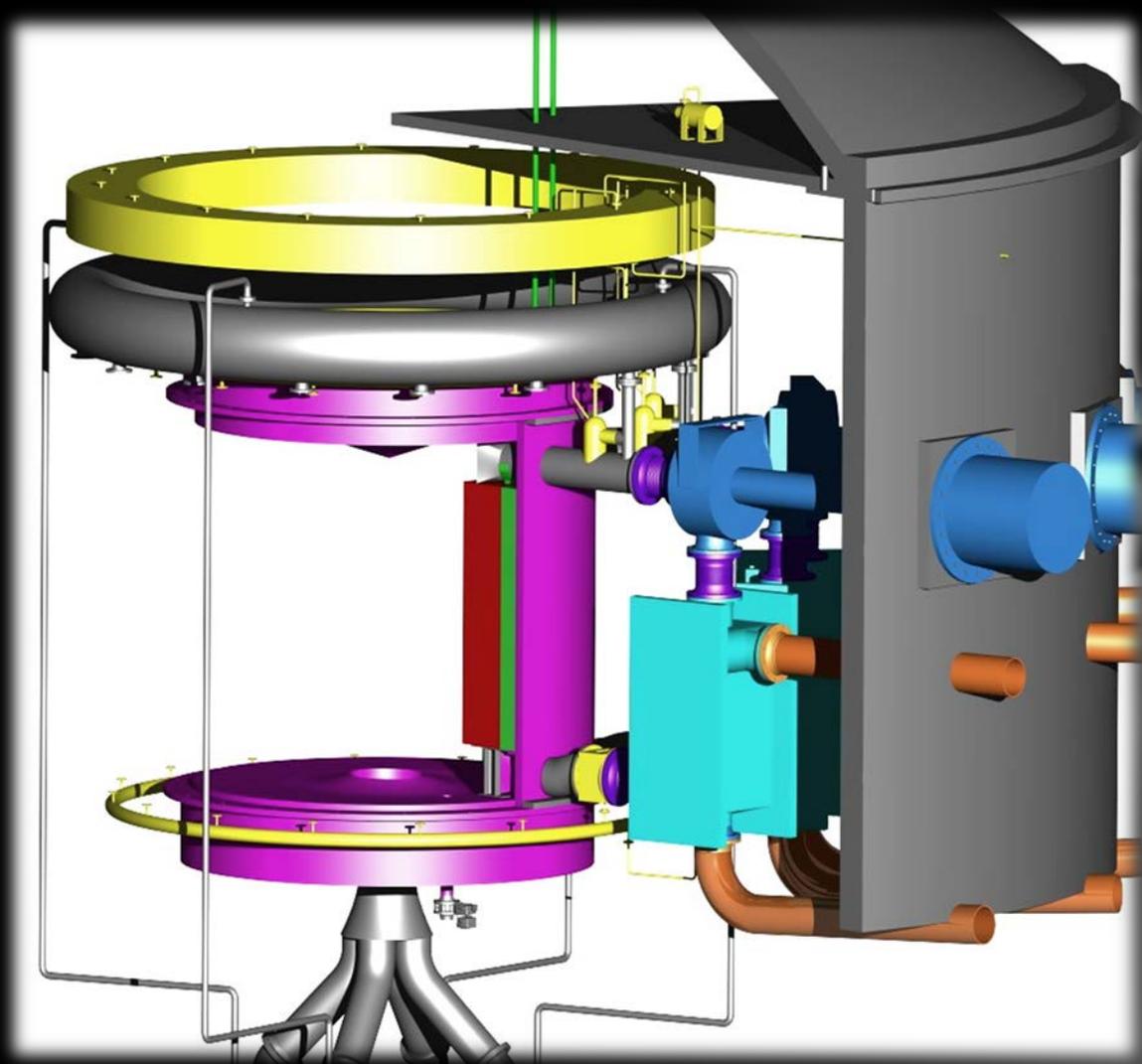
- The Molten Salt Fast-neutron Reactor (MSFR) is a long-term alternative to solid-fuelled fast-neutron reactors offering very negative feedback coefficients and simplified fuel cycle. Its potential has been assessed but specific technological challenges must be addressed and the safety approach has to be established.
- The AHTR is a high temperature reactor with better compactness than the VHTR and passive safety potential for medium to very high unit power (> 2 400 MWth).

Vue détaillée du MSFR



Ces vues ont pour but essentiel de mettre en place une méthode pour l'approche de sûreté.
Le réacteur réel sera certainement très différent

Vue détaillée du MSFR



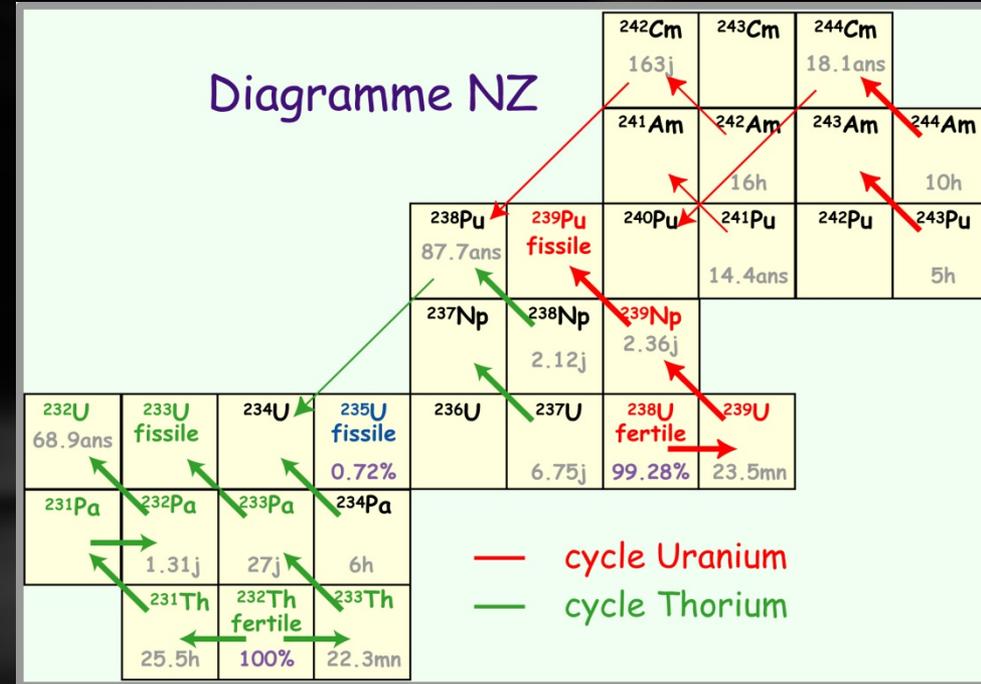
Ces vues ont pour but essentiel de mettre en place une méthode pour l'approche de sûreté.
Le réacteur réel sera certainement très différent



Disponibilité de la matière fissile

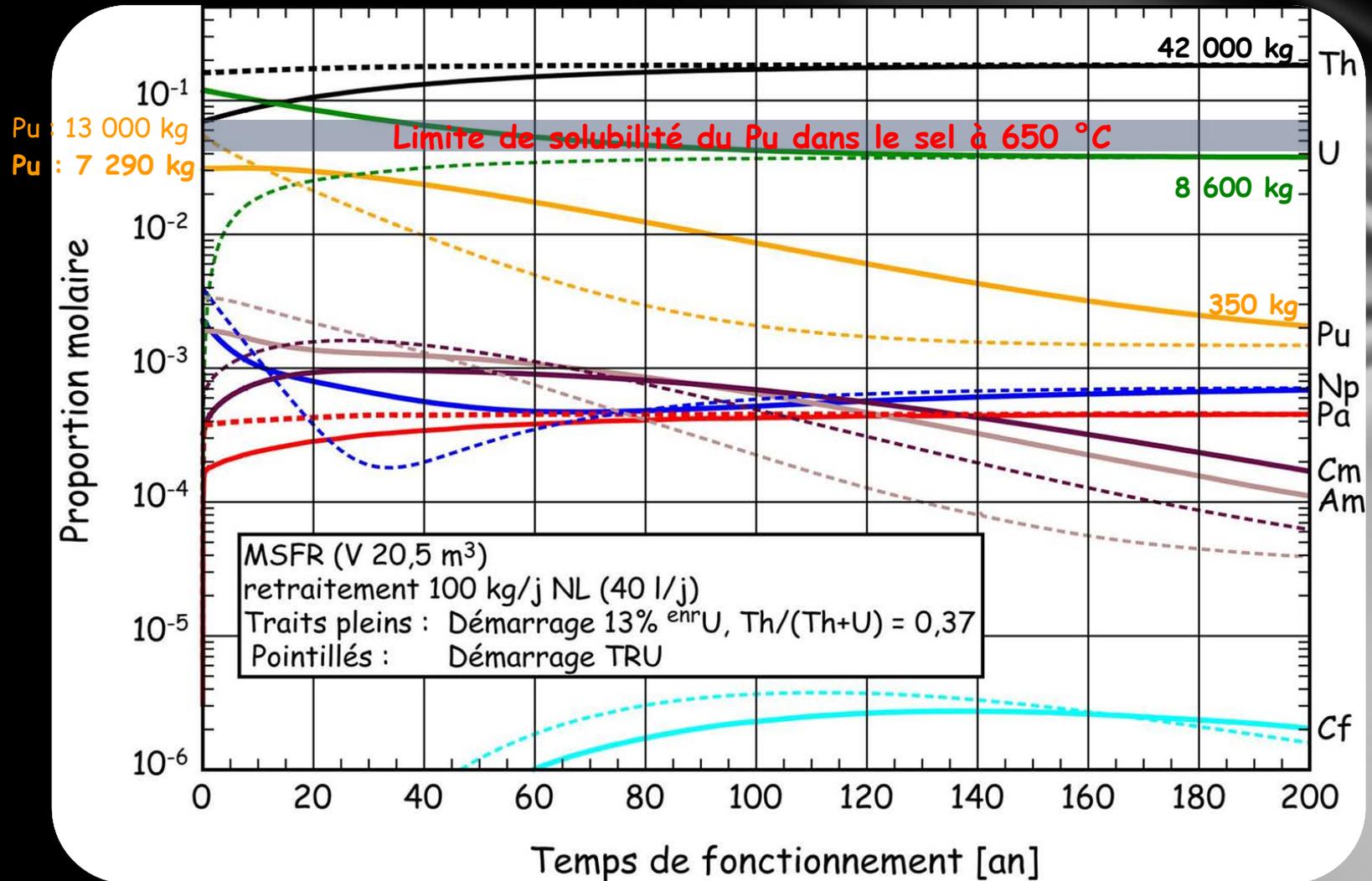
Pour tout réacteur nucléaire, on a besoin de matière fissile pour le démarrer

- Dans le cas des réacteurs actuels (REP, CANDU), il faut disposer de matière fissile durant toute la vie du réacteur
- Dans le cas d'un réacteur régénérateur (MSFR, RNR-Na), on en a besoin une seule fois pour le démarrage
 - Dans le cas d'un réacteur en combustible solide, il faut 2 charges
 - Pour un réacteur en combustible liquide, une seule charge suffit



- Dans la nature on ne dispose que de ^{235}U (0,72% de $l^{\text{nat}}\text{U}$)
 - A partir de cet ^{235}U , il faut donc produire, soit du ^{239}Pu , soit de $l^{233}\text{U}$ pour démarrer de nouvelles filières
 - Pour démarrer une filière Th-U on peut donc envisager 3 solutions :
 - Démarrer directement à $l^{235}\text{U}$ (Uranium enrichi de 5 à 30%)
 - Démarrer avec le Plutonium des REP actuels, ou mieux l'ensemble de leurs transuraniens (TRU)
 - Produire de $l^{233}\text{U}$ dans les REP actuels pour démarrer directement à $l^{233}\text{U}$
 - On peut aussi faire un mix de ces solutions...

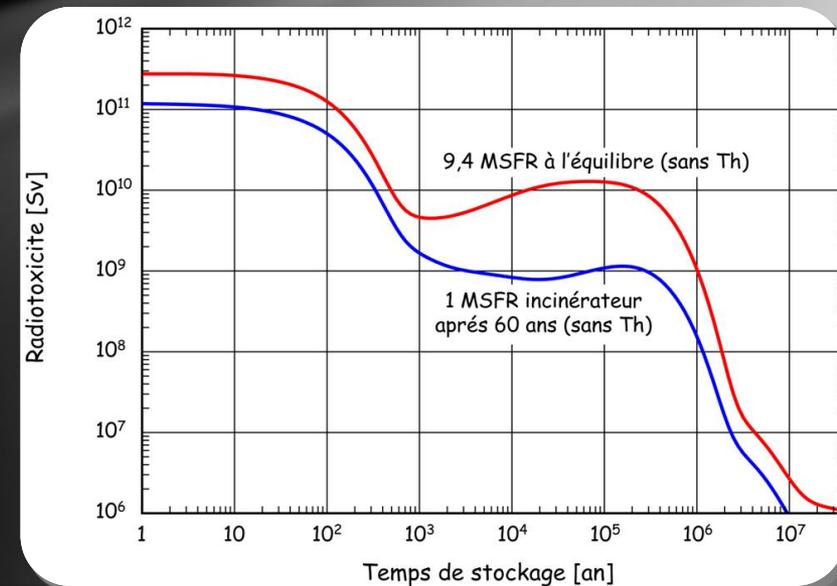
Démarrage de la filière Th-²³³U avec de l'^{enr}U et des TRU issus des REP



Fin de jeu (réduction de l'inventaire final)

- Si, lors du retraitement du combustible, les rejets en actinides sont de 0,1% et que le volume du cœur est retraité en 5 ans, alors l'inventaire en actinides est supérieur aux rejets pendant au moins 5000 ans
 - Il est donc plus important de savoir réduire l'inventaire final lors de l'arrêt de la filière que d'améliorer encore l'efficacité du retraitement
 - C'est pourquoi nous avons étudié un incinérateur permettant de réduire l'inventaire de 9 MSFR en 60 ans
- On utilise un réacteur identique au MSFR sauf le sel et l'absence de couverture fertile
 - Sel FLiNaK (46,5% ^7LiF , 11,5% NaF, 41,7% KF)
 - Point de fusion acceptable avec très peu de noyaux lourds
 - Spectre pas trop thermalisé
- Fonctionnement de l'incinérateur
 - Charge initiale pour être critique
 - 685 kg des transthoriciens du MSFR à l'équilibre
 - Alimentation
 - Les transthoriciens du MSFR à l'équilibre en quantité suffisante pour maintenir la réactivité
 - Arrêt de l'incinération après 60 ans de fonctionnement
 - Incinération de l'équivalent de 9,4 inventaires de MSFR
- On compare alors la radiotoxicité des 9,4 inventaires de MSFR à l'équilibre avec l'inventaire final de l'incinérateur après 60 ans de fonctionnement

kg	9,4 MSFR	Inventaire à 60 ans	Taux de réduction
U	72 751	6 407	11,5
Np	1 381	506	2,8
Pu	2 768	1 530	1,8
Am	72	39	1,8
Cm	33	64	0,5
NL	77 005	8 550	9,1



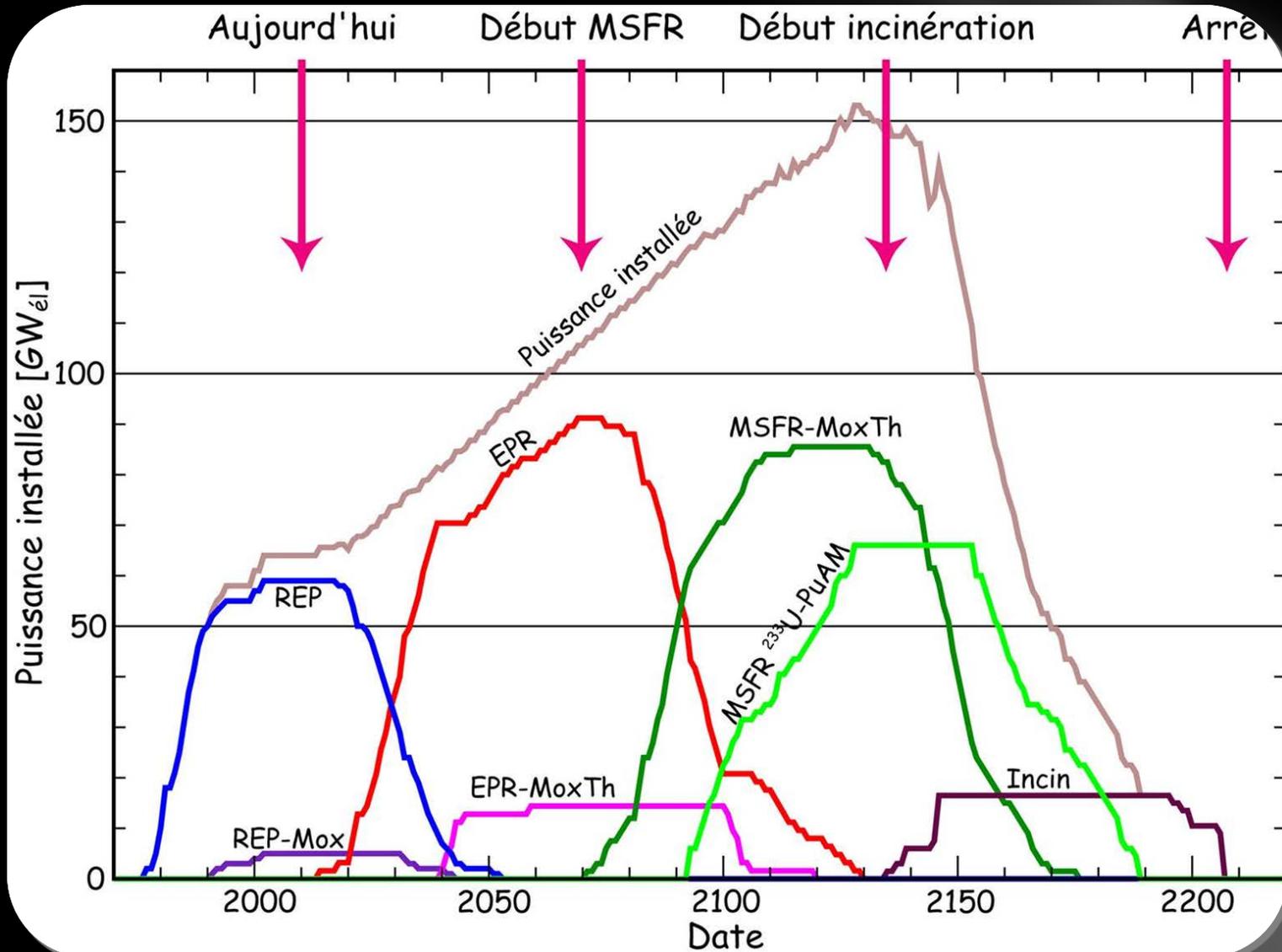
Scénario de déploiement de MSFR en France

On suppose une faible contrainte sur la ressource ^{nat}U et un doublement linéaire de la puissance installée entre 2020 et 2100

- **Les REP actuels sont arrêtés après 40 à 50 ans de fonctionnement**
 - 10% du parc est moxé
 - Les AM sont mélangés aux PF et stockés dans les verres
 - Progressivement l'uranium appauvri à 0,3% est réenrichi pour le laisser à 0,1%
 - L'uranium de retraitement est aussi réenrichi pour être laissé à 0,1%
- **Des EPR prennent le relais à partir de 2014**
 - À partir de 2040 certains EPR fonctionnent en MOx-Th et les AM sont toujours mélangés aux PF
 - Jusque là aucun MOx n'est retraité
- **À partir de 2070 des MSFR sont démarrés en utilisant les actinides des MOx-Th irradiés**
 - les AM de ces MOx-Th irradiés sont mis en cœur
- **Dès que possible des MSFR sont démarrés avec un mélange ^{233}U -PuUOx ou ^{233}U -PuMOx**
 - les AM de ces combustibles irradiés (UOx et MOx) sont mis en cœur
- **Dans la première moitié du XXII^{ème} siècle une décision d'arrêt du nucléaire de fission est prise**
 - Des MSFR incinérateurs se chargent de réduire les inventaires de sortie des MSFR mis progressivement à l'arrêt

On s'intéressera à l'évolution du parc, aux inventaires en PF et actinides ainsi qu'à leur radiotoxicité à long terme

Évolution du parc installé énergie totale produite : 138 000 TWh dont 72 300 TWh produits par les MSFR



Évolution des stocks d'actinides pendant la vie du parc

Les uraniums appauvris à 0,3% et uranium de retraitement peuvent être entièrement consommés

- On ne retrouve dans les stocks que de l'uranium appauvri à 0,1%

Les Pu-UOx, Pu-MOx et AM-MOx peuvent être totalement incinérés

- La plupart des AM-UOx sont immobilisés dans les verres
 - Il en reste 6 000 tonnes !

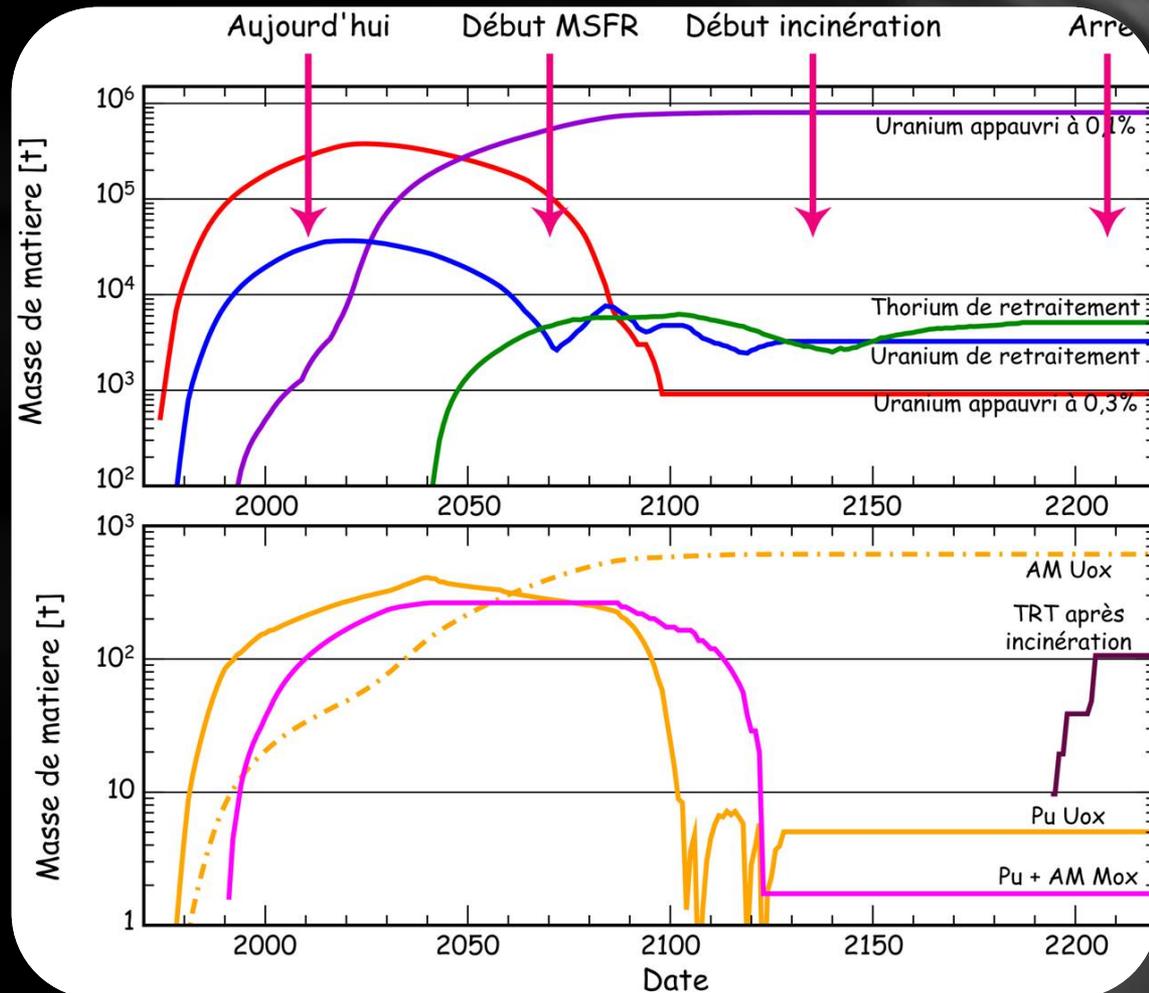
Après incinération il ne reste que 100 tonnes de transthoriciens issus des MSFR

Les besoins en ressources naturelles sont

- 821 400 t d' ^{nat}U
- 11 600 t de Th
 - La France dispose déjà de 8 000 t de thorium (Rhodia)

Environ 18 000 t d'actinides sont fissionnées (138 000 TWh)

- 11 700 t à partir de l' ^{nat}U
- 6 300 t à partir du Th



Radiotoxicité à long terme après la production de 138 000 TWh

La radiotoxicité à long terme est dominée par les AM-UOx emprisonnés dans les verres

- On a supposé que tous les AM associés aux Pu utilisés dans les MOx ont été mélangés aux PF dans les verres

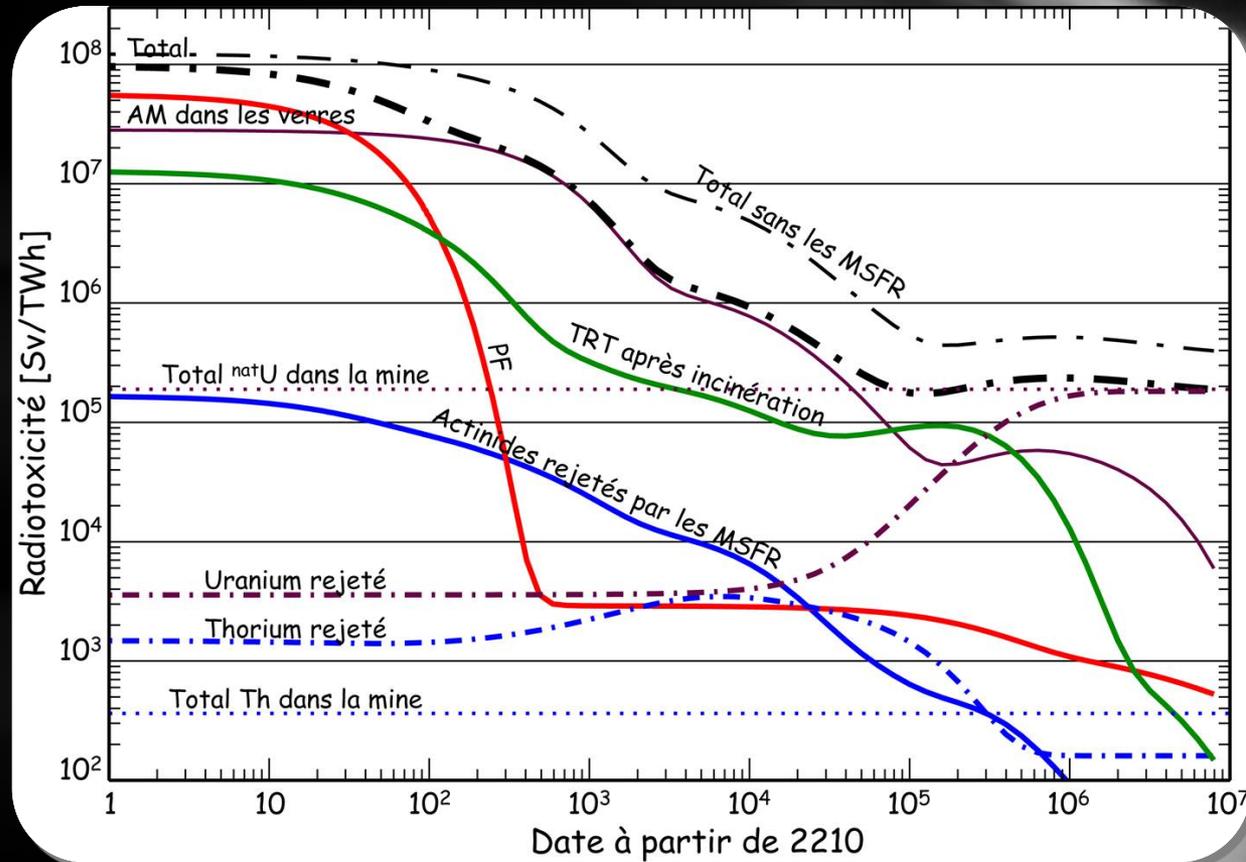
Après 300 000 ans c'est l'uranium rejeté (appauvri + retraité) qui domine la radiotoxicité à long terme

- Les descendants à longue période de l' ^{238}U tels que ^{230}Th et ^{234}U font fortement remonter la radiotoxicité de l'uranium après 100 000 ans

Les TRT (transthorien) issus des MSFR après incinération passent sous l' ^{238}U extrait après 3 000 ans

Sans les MSFR la radiotoxicité est 3 à 5 fois plus importante, par TWh, dans la période 1000-100000 ans

Production sans les MSFR : 65 700 TWh



Quel est l'avenir du nucléaire civil ?

Le but premier des réacteurs de 4^{ème} génération est d'économiser la ressource naturelle qu'est l' ^{235}U

- **La solution ultime passe par la régénération**

En cycle U-Pu la régénération n'est possible qu'en spectre rapide

Les réacteurs proposés (RNR-Na, RNR-Pb ou RNR-He) vont être très difficiles à rendre compétitifs du fait de problèmes liés à :

- **La sûreté**
- **La prolifération**
- **Les capacités de déploiement**

Ces réacteurs permettraient, toutefois, d'assurer le but premier

- **Préserver la ressource**

Les réacteurs actuels sont très compétitifs et disposent d'un retour d'expérience considérable

- **Des améliorations sur l'économie d' ^{235}U sont possibles au point de pouvoir assurer un déploiement massif du nucléaire pendant plus d'un siècle**
- **Des évolutions de ces réacteurs permettraient d'aller encore plus loin**

Ces optimisations pourraient permettre d'attendre la mise en place d'une autre source d'énergie

- **La fusion par exemple**

Cette filière pose, toutefois, le problème de la gestion des actinides mineurs

- **Np, Am, Cm**

Les réacteurs de 4^{ème} génération pourront être l'avenir du nucléaire civile si, et seulement si, leur coût du kWh n'est pas (beaucoup) plus cher que celui des réacteurs actuels tout en respectant la sûreté et la réduction de la production de déchets

Le cycle thorium en combustible liquide et plus particulièrement le MSFR pourrait être une alternative. Le grand potentiel présenté par ce type de réacteur devrait inciter à aller plus loin dans les recherches