



In2p3

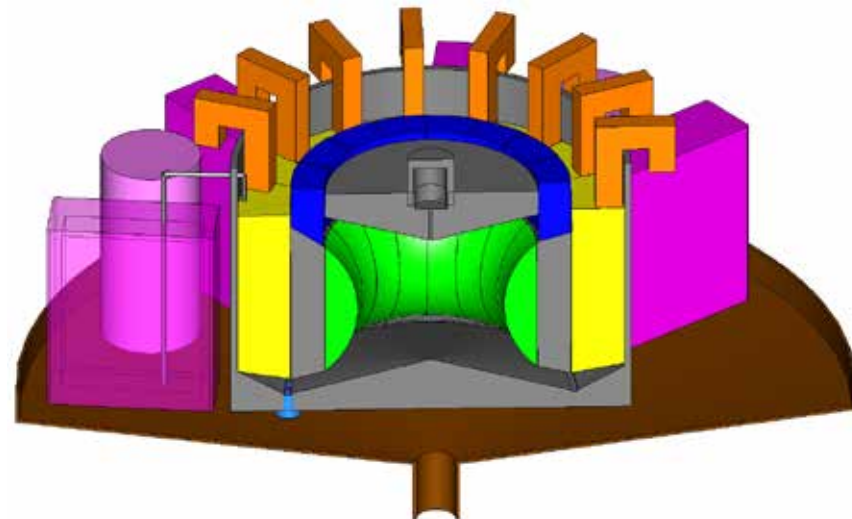


LE MSFR

(Molten salt fast reactor)

Daniel Heuer

*Groupe Physique des Réacteurs
du LPSC*



Le cycle thorium et les combustibles liquides

Quelles sont les contraintes sur le type de liquide ?

- Transparence aux neutrons
- 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 sont défavorables au cycle uranium

La solubilité du plutonium dans les fluorures est limitée



Cycle Thorium

Quels sont les avantages d'un combustible liquide ?

- Ø Homogénéité du combustible (pas de plan de chargement)
- Ø Chaleur produite directement dans le caloporteur
- Ø Possibilité de reconfigurer le cœur en quelques minutes
 - Ø Une première configuration permet d'optimiser la production d'énergie en gérant le risque de criticité
 - Ø Une deuxième configuration permet un stockage avec refroidissement passif
- Ø Possibilité de retraiter le combustible sans arrêter le réacteur
 - Ø Pas de réserve de réactivité
 - Ø Meilleure gestion des produits de fission neutrophages
 - Ø 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 et EDF dans les années 90 et 2000

France CNRS depuis les années 2000

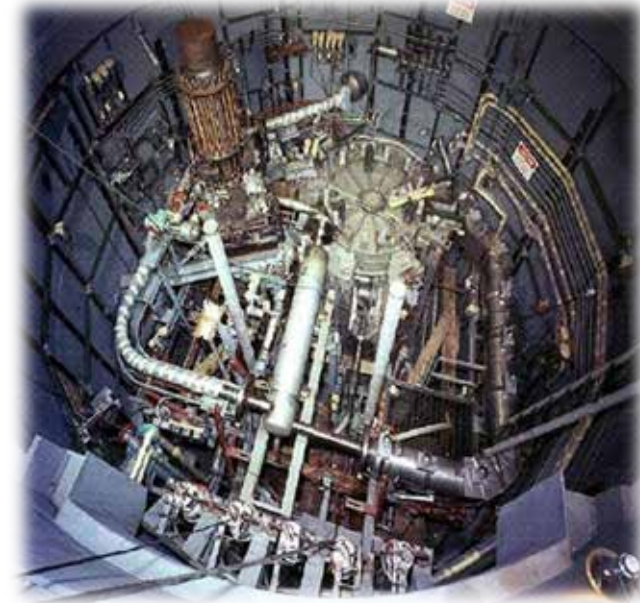
Russie depuis les années 90

USA dans les années 90

Tchéquie depuis les années 2000

Chine depuis 2011

...



En 2002, le forum international
GEN IV a retenu le MSBR
parmi 6 concepts

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

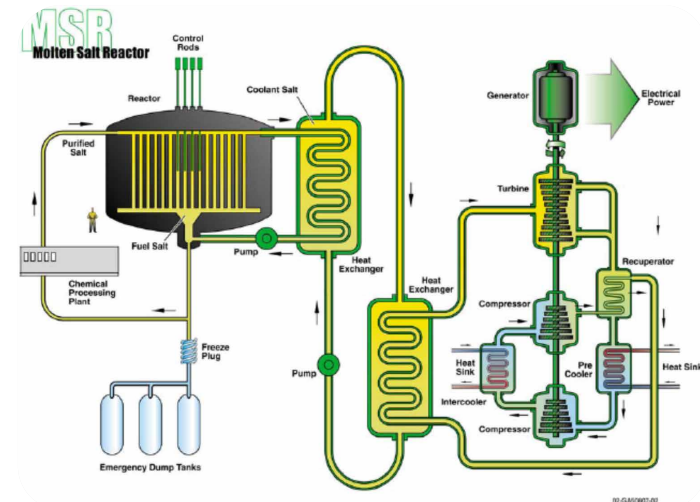
Retraitement peu réaliste ($4 \text{ m}^3/\text{j}$)

Présence de graphite en cœur

durée de vie limitée (2 à 5 ans)

difficultés de retraitement ou de stockage

risques d'incendie

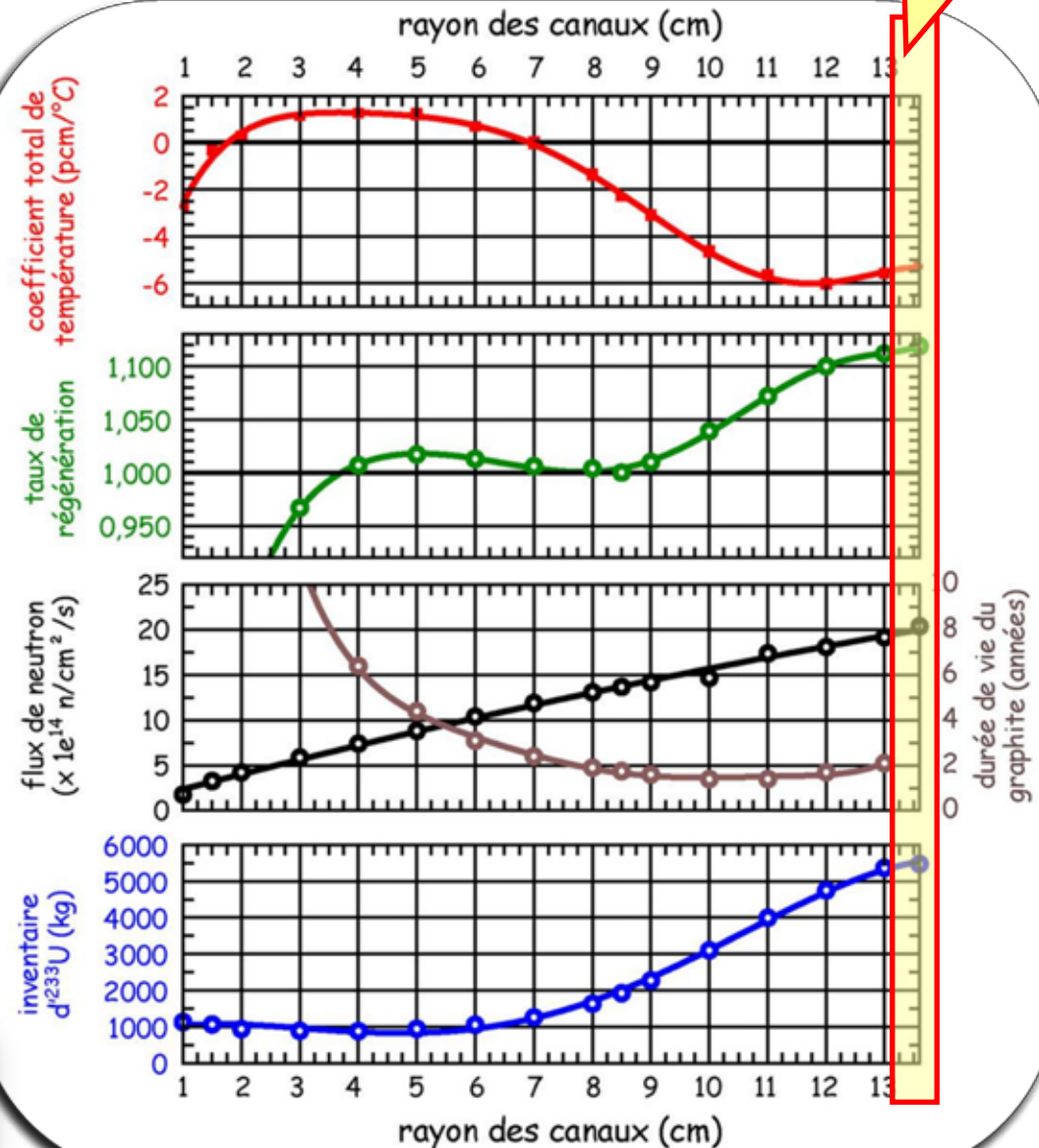
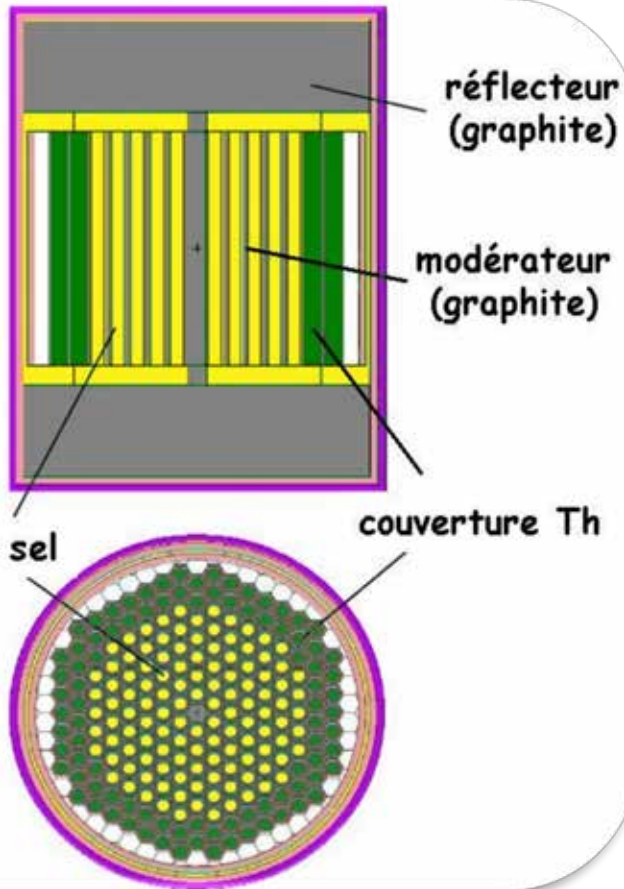


Globalement le MSBR n'a pas les capacités à devenir un réacteur industriel

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

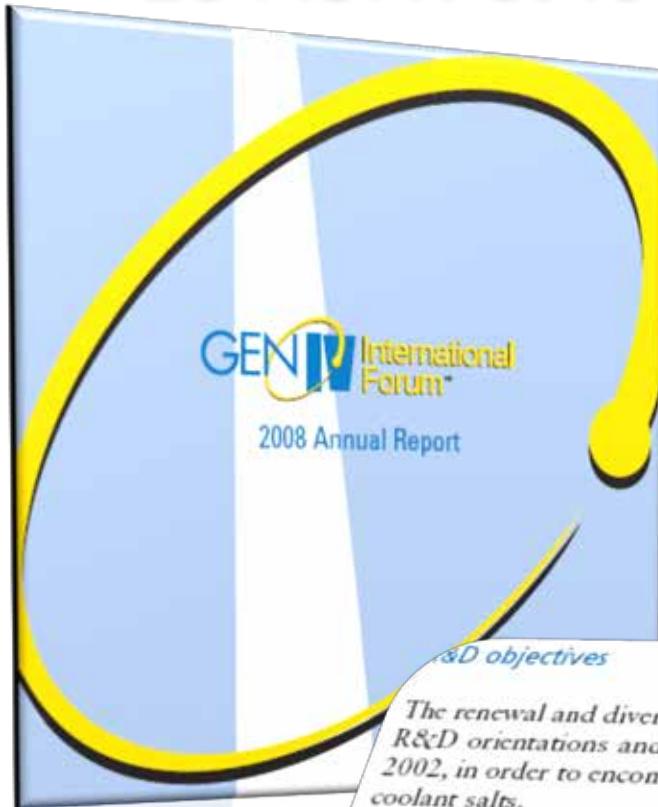
Du TMSR (Thorium Molten Salt Reactor) au MSFR (Molten Salt Fast Reactor)

Le MSFR



Le MSFR est un réacteur régénérateur à spectre rapide

Le MSFR et le forum international GEN IV



Le forum international GEN IV dans le cadre du "MSR Steering Committee" a validé ce concept de réacteur à sels fondus en spectre rapide en lui donnant le nom de "MSFR"

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 MW_{th}).*

Le MSFR et le forum international GEN IV



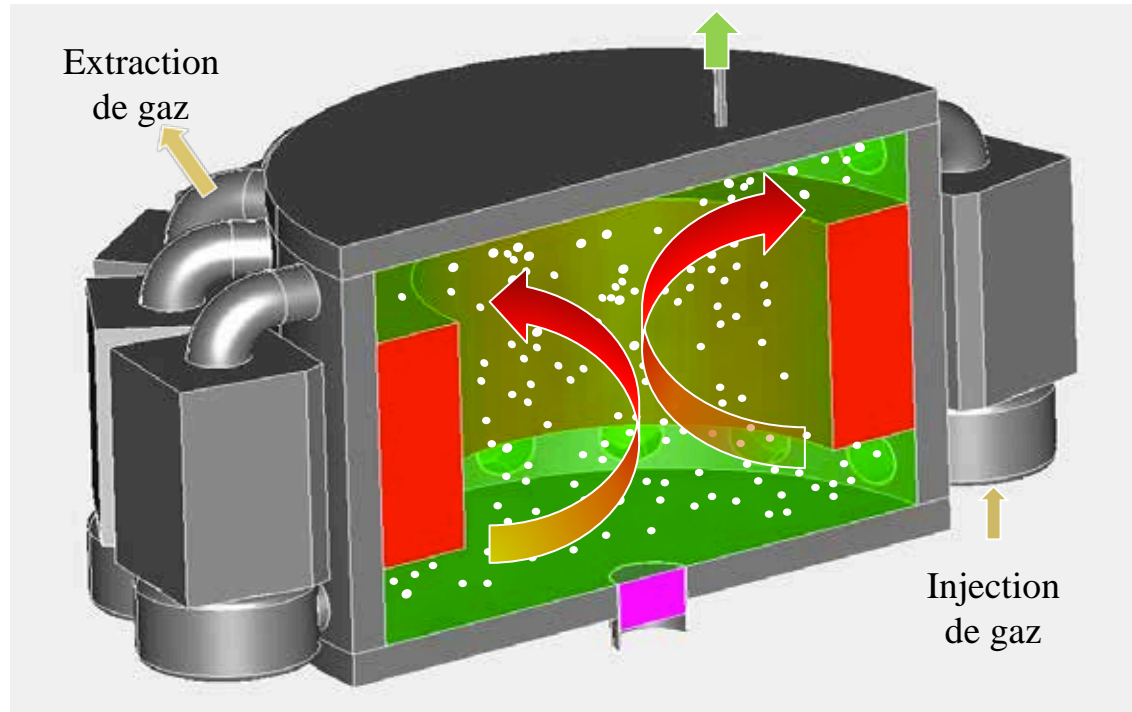
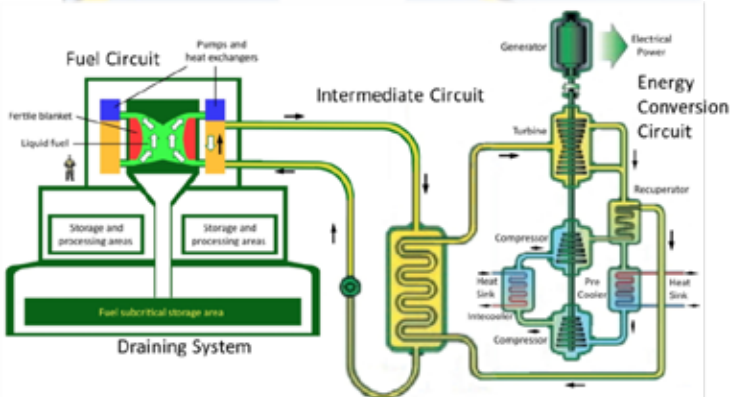
Le forum international GEN IV dans le cadre du "MSR Steering Committee" a validé ce concept de réacteur à sels fondus en spectre rapide en lui donnant le nom de "MSFR"

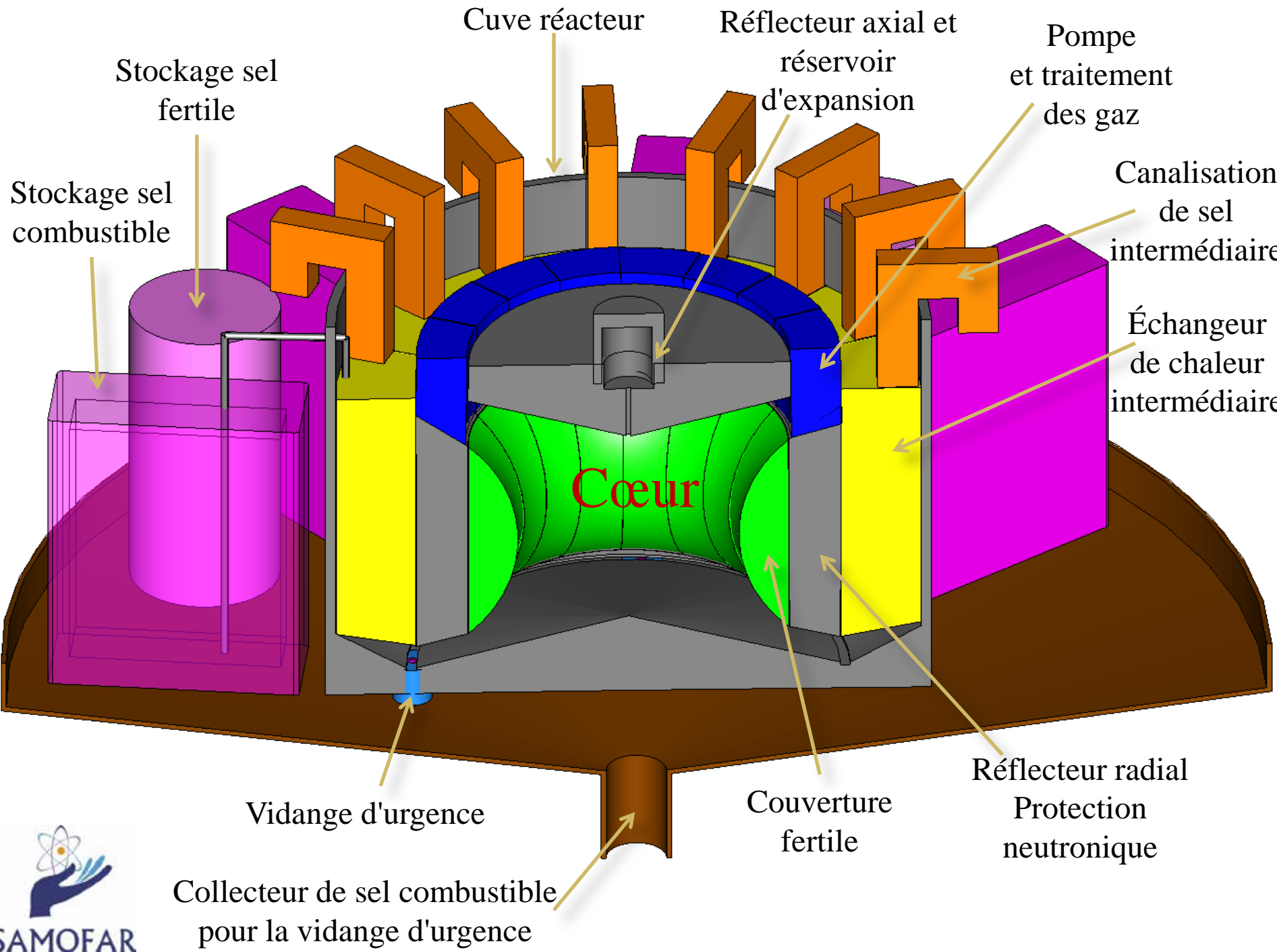
Ce choix a été entériné par le "Policy Group" en 2008

Les aspects technologiques spécifiques doivent être investigués

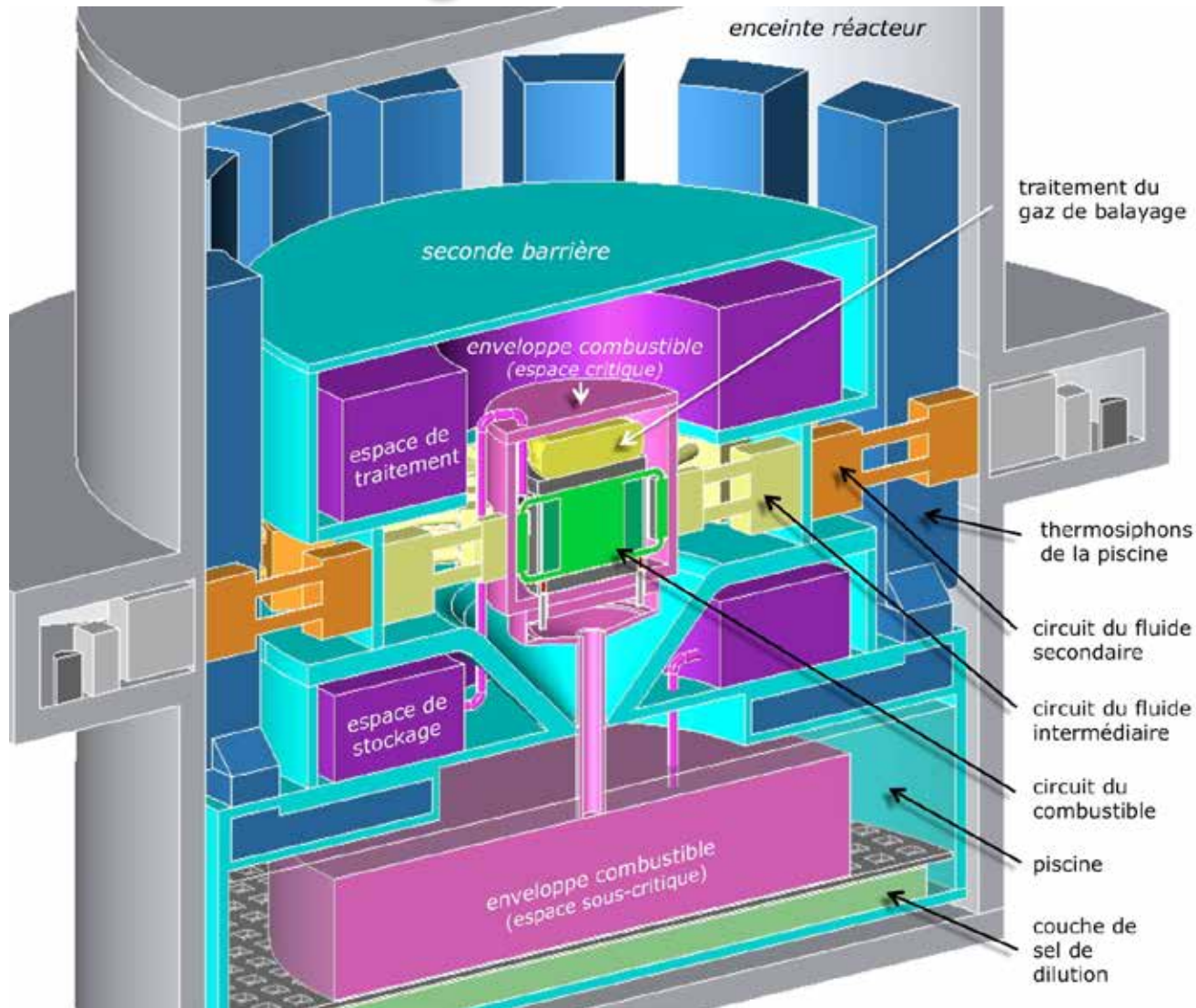
Une approche de sûreté spécifique doit être établie

Retraitement journalier
(ponction de 10 à 40 litres de sel)





Vue globale du MSFR



Cette vue montre les différents espaces à gérer ainsi que l'organisation des barrières de confinement

Rose pour la première, bleue pour la deuxième et grise pour la troisième

Le MSFR de référence

Sel initial : 77,5% ${}^7\text{LiF}$ - 20% ThF_4 , -2,5% ${}^{233}\text{UF}_4$
Température du sel combustible : 650 à 750 °C
Température maximum des parois : 700 °C
Puissance : 3 GW_{th} (1,4 GW_{el})

Inventaire initial d' ${}^{233}\text{U}$ par réacteur : 5060 kg
Inventaire initial d' ${}^{233}\text{U}$ par GW_{el} : 3610 kg

Volume de sel combustible : 18 m^3
1/2 dans le cœur
1/2 dans les échangeurs et tuyaux

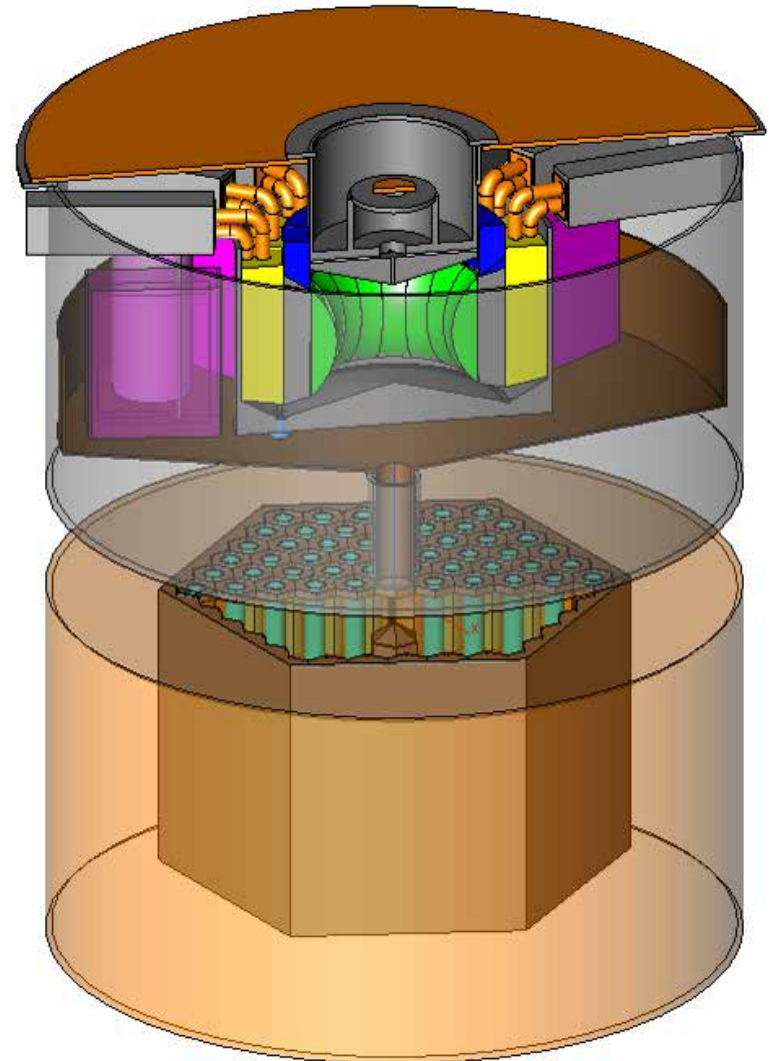
Retraitement du cœur : 10 à 40 l/j

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

Epaisseur de la couverture fertile : 50 cm
Volume de la couverture : 7,3 m^3
Sel de la couverture : 77,5% ${}^7\text{LiF}$, -22,5% ThF_4
Retraitement de la couverture : 40 l/j

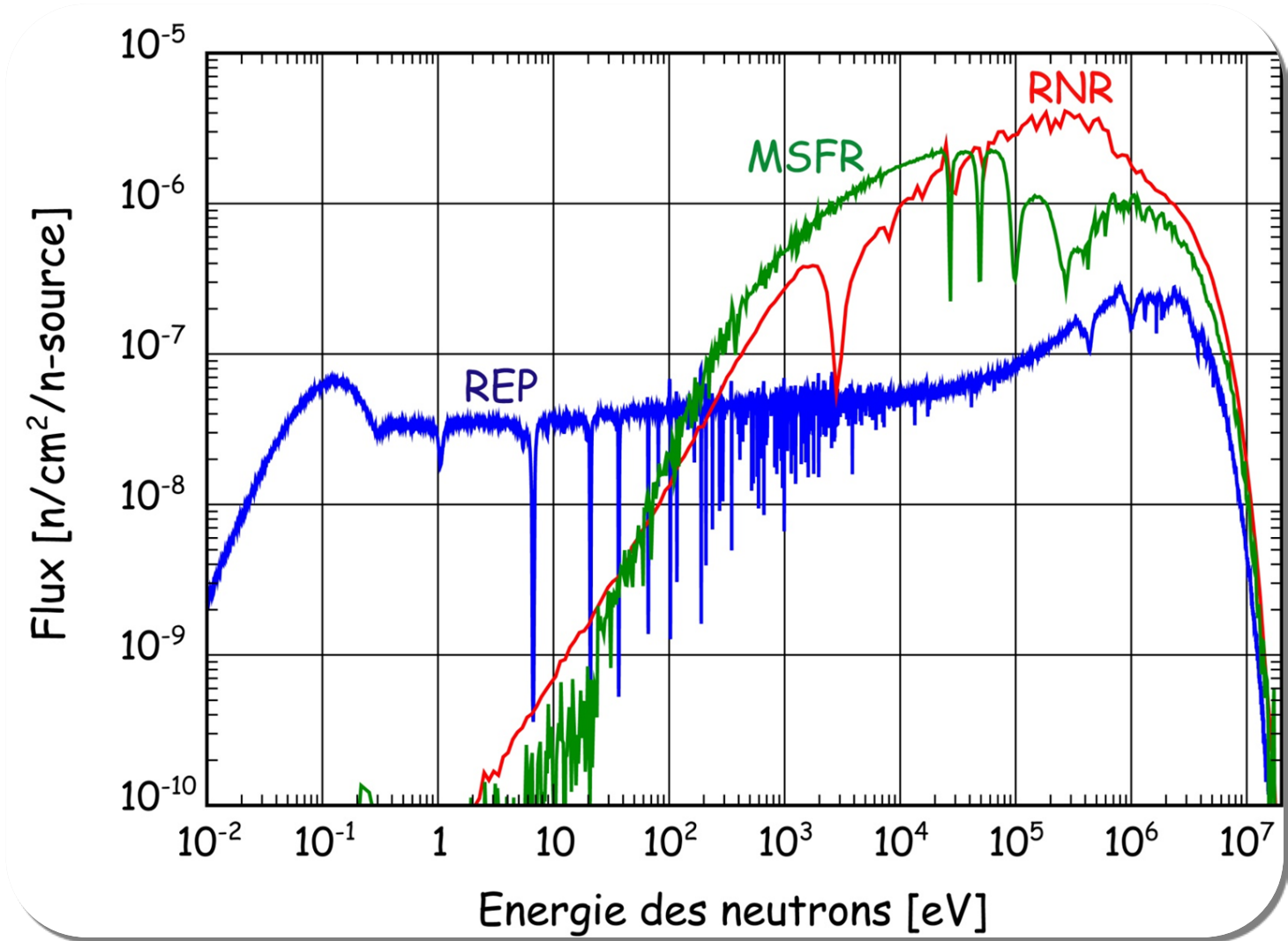
Coefficient de contre réaction: de -5,3 à -4,8 pcm/K
Densité : de -3,7 à -3,3 pcm/K
Doppler : de -1,6 à -1,5 pcm/K

Production d' ${}^{233}\text{U}$: 50 à 95 kg/an
Temps de doublement : 55 à 100 ans



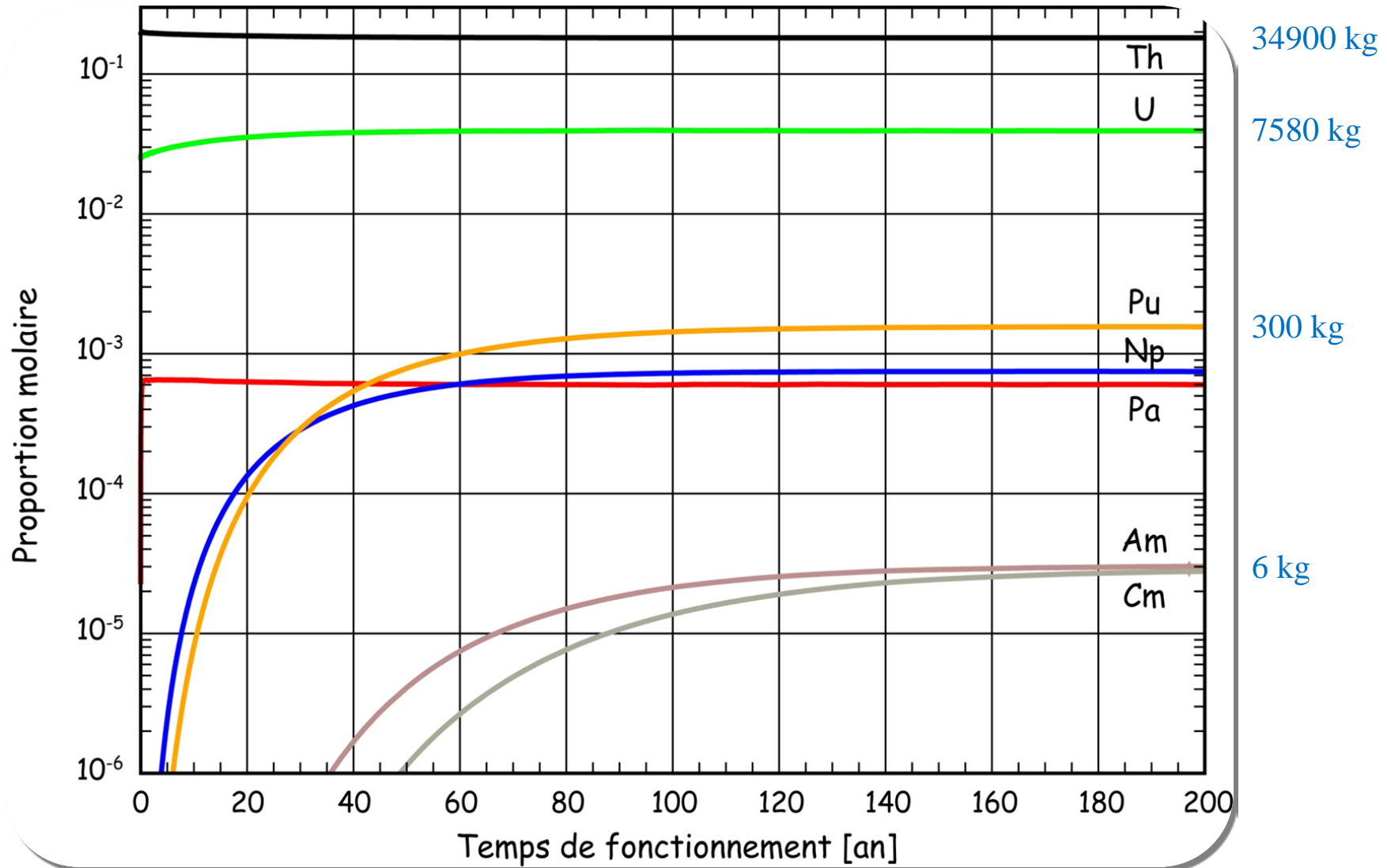
Le MSFR

Comparaison avec les spectres neutroniques REP et RNR



Moins de Neutrons rapides = moins de dégâts aux matériaux

Évolution du combustible (démarrage à l' ^{233}U)



Les températures extrêmes

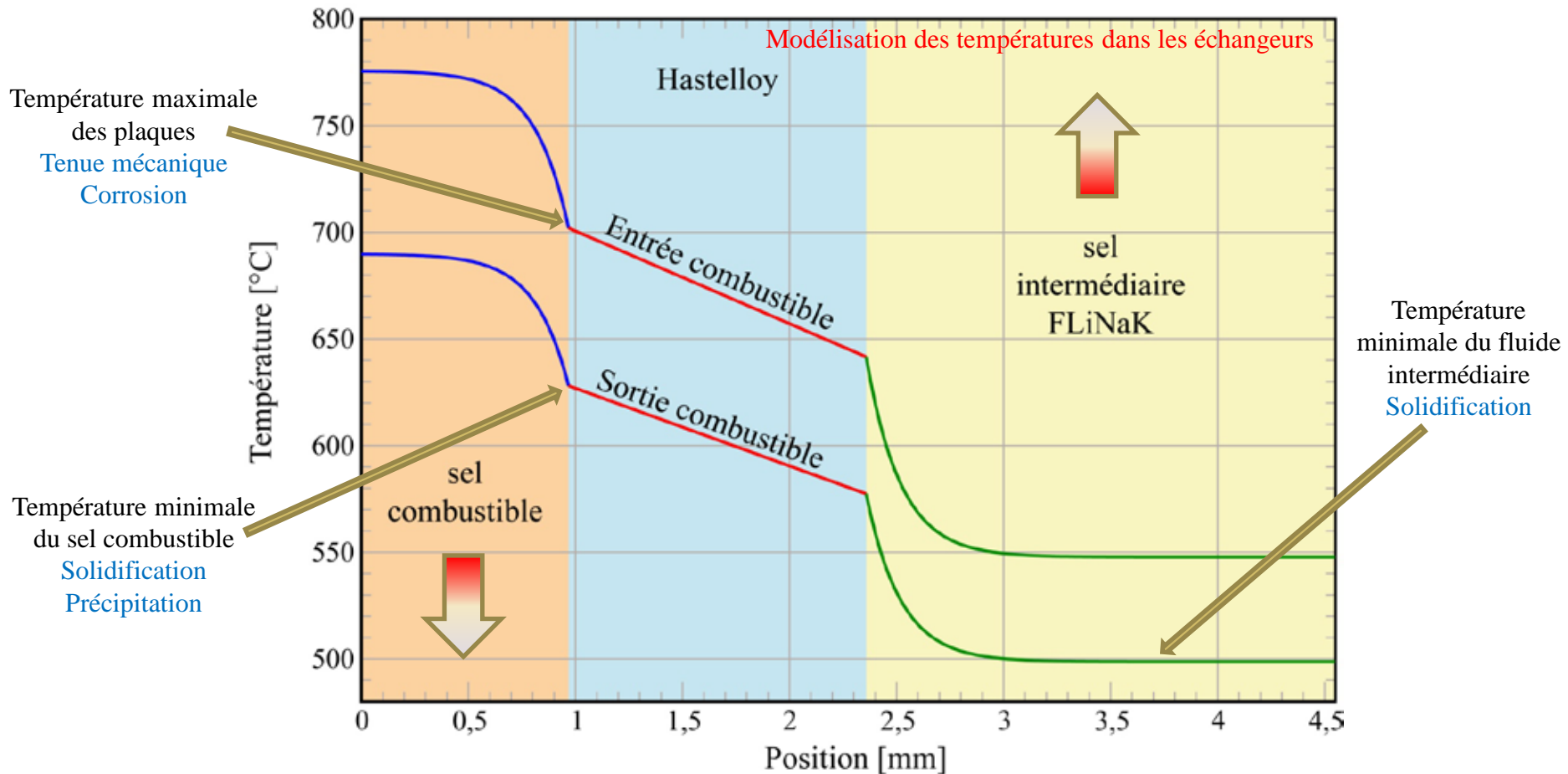
Tous les éléments de structure peuvent être protégés thermiquement

Sauf les échangeurs de chaleur

On suppose des échangeurs à plaques

La faible conductivité thermique des sels protège les plaques

Certaines températures sont critiques



Pilotage de la puissance par la demande (cinétique point)

Si on augmente la demande de puissance, le combustible est trop refroidi et donc sa température diminue

Ce refroidissement provoque une augmentation de la réactivité

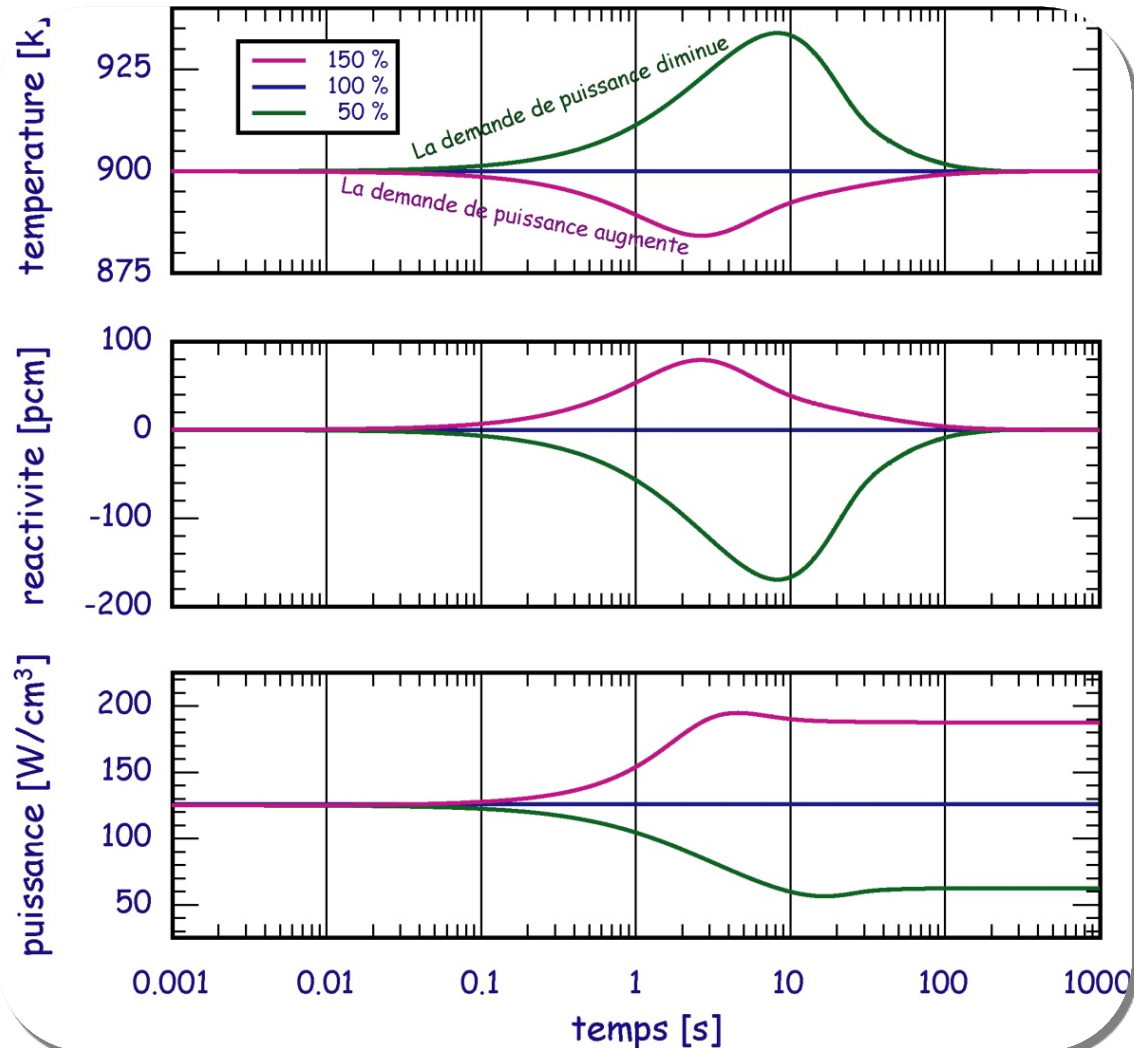
Il s'ensuit une augmentation de la puissance fournie par le combustible jusqu'à un niveau supérieur à la demande

La température peut alors remonter jusqu'à revenir à son niveau initial

Ce qui ramène la réactivité à zéro

Au final, la puissance fournie est devenue égale à la puissance demandée

C'est exactement la même chose, mais en miroir, qui se produit si on diminue la puissance demandée



Les barres de contrôle ou de commande ne sont pas utiles
Elles représentent en fait un risque d'insertion de réactivité

Suivi de charge de 1 GW à 3 GW en 10 secondes

Suivi de charge de 1 GW à 3 GW en 10 secondes

Variation de concert du débit de la pompe et de la température du fluide intermédiaire.

Il s'agit de maintenir l'écart de température constant en cœur durant le suivi de charge.

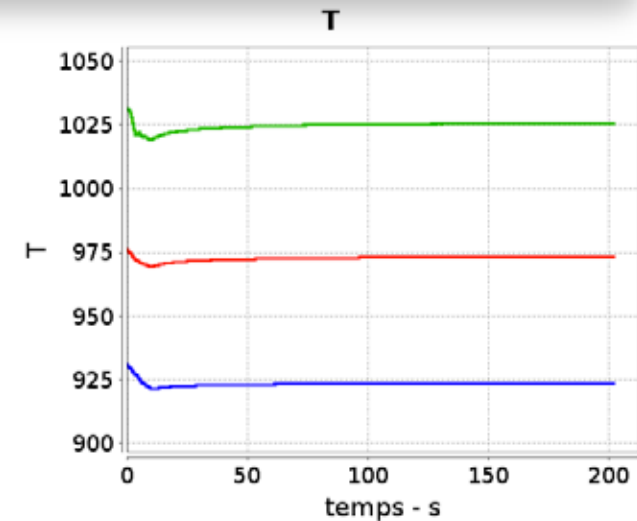
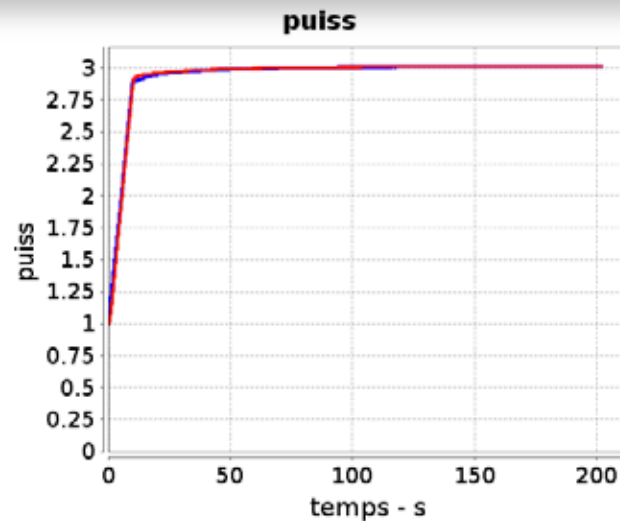
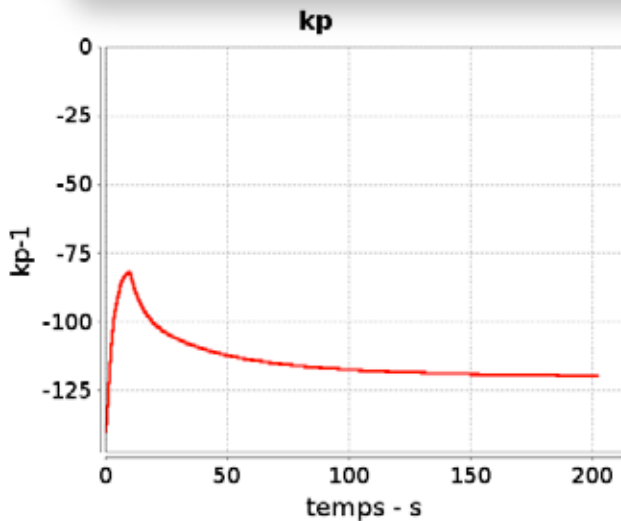
La puissance en cœur suit parfaitement la puissance demandée

Courbes bleue et rouge superposées

Les températures du sel combustible ne varient que de quelques degrés

Les températures des matériaux de structure varient encore moins !

Il est clair que le circuit de conversion ne peut pas suivre un tel rythme
Les capacités de suivi de charge ne sont limitées que par le circuit de conversion



Insertion de 1000 pcm en 1 seconde

1000 pcm sont insérés linéairement en 1 seconde

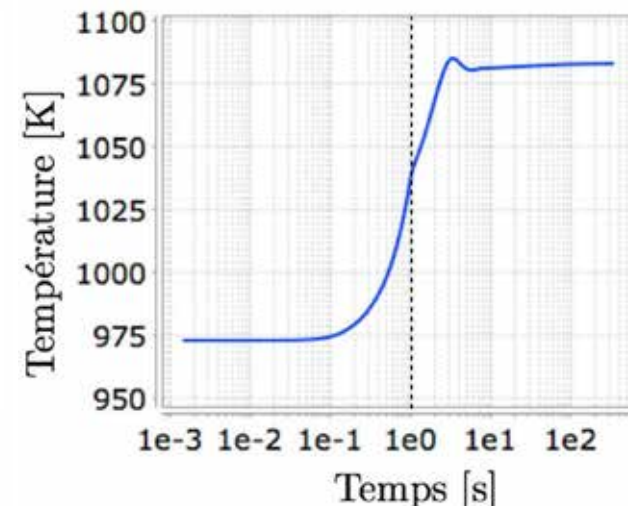
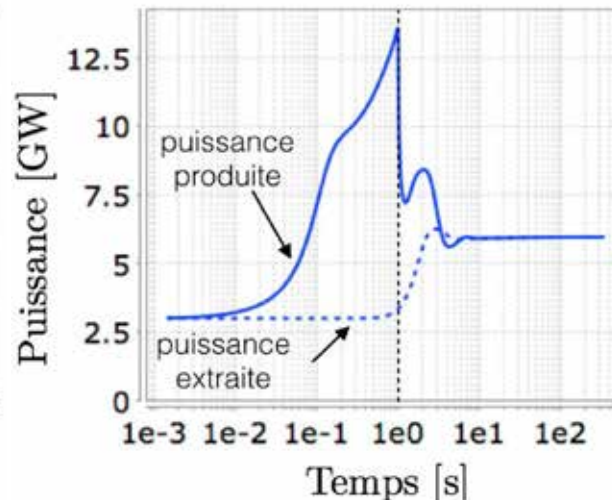
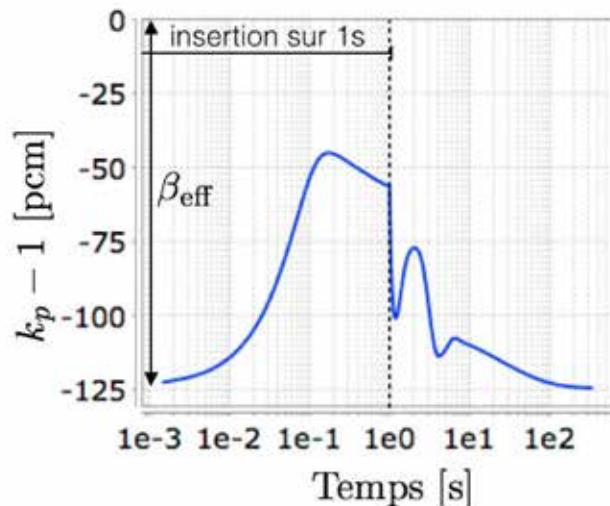
L'augmentation de réactivité provoque une augmentation de puissance qui chauffe le sel en cœur

En un dixième de seconde, les contre-réactions stoppent l'augmentation de réactivité qui reste très en dessous de la prompte criticité alors que la fraction de neutrons retardés n'est que de 125 pcm

À 1 seconde, l'insertion de réactivité s'arrête et cette dernière chute rapidement

Un peu plus tard, le sel froid contenu dans les échangeurs de chaleur entre dans le cœur et provoque un regain de réactivité qui s'estompe rapidement

Le cœur retrouve un fonctionnement stable en quelques secondes lorsque la puissance extraite égalise de nouveau la puissance produite



Accident de sur-refroidissement

L'extraction de puissance passe de 1 kW à 3 GW

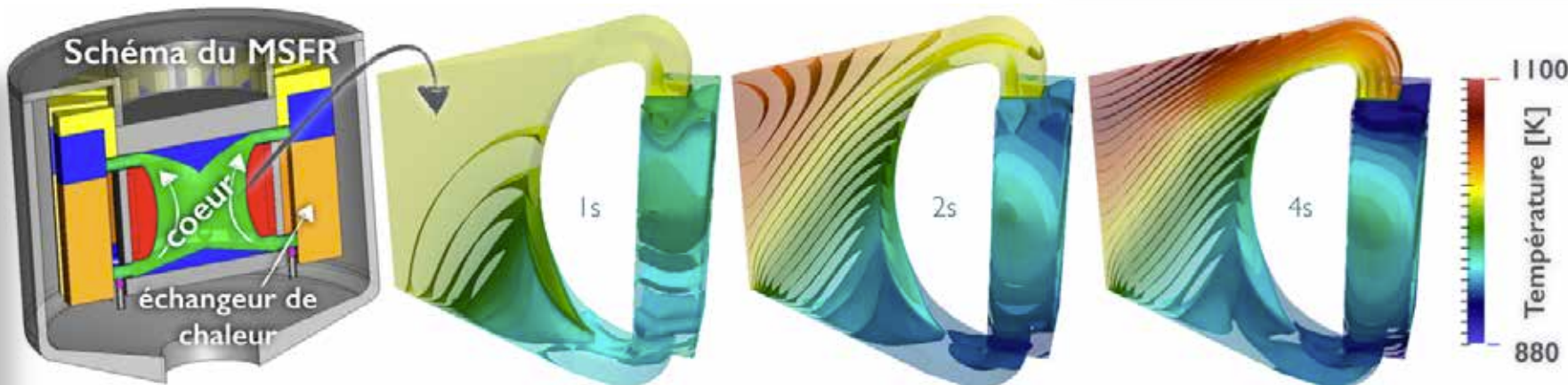
Si le transitoire se produit en moins d'une minute, le cœur atteint la prompte criticité

Il faudrait réaliser une étude précise de thermomécanique pour évaluer les conséquence d'un tel transitoire

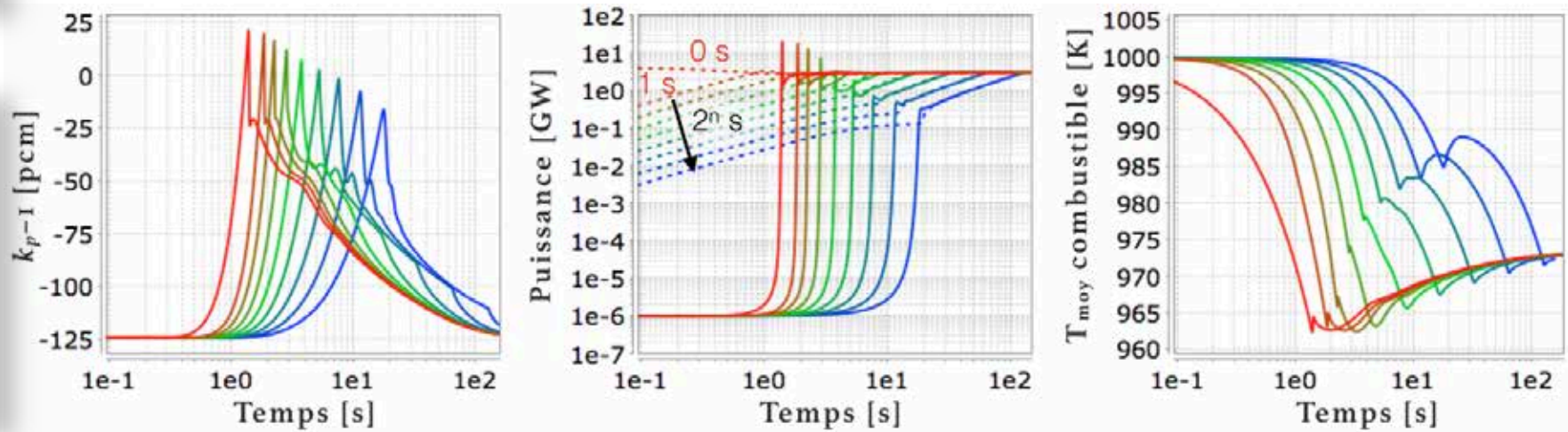
Si le transitoire est plus lent (inertie du circuit intermédiaire) le réacteur s'adapte très rapidement

Les contre-réactions agissent dès le début du transitoire et la réactivité décroît bien avant la fin du transitoire

Sur-refroidissement
instantané



Sur-refroidissement
en 2ⁿ secondes



L'unité de retraitement associée

40 litres de sel combustible sont extraits chaque jour pour être retraités

Une fluoration permet de séparer 99% des U et Np et 90% des Pu

Ces éléments sont réinjectés dès que possible dans le cœur

Une première extraction réductrice permet de séparer les autres transthoriens

Ils seront, eux aussi, rapidement réinjectés dans le cœur

Une deuxième extraction réductrice permet de séparer les lanthanides

Ils seront rejetés sous forme d'oxyde

40 litres de sel couverture sont extraits chaque jour pour être retraités

Une fluoration permet de séparer les U, Np et Pu

Np et Pu sont réinjectés dans le cœur
U est stocké et utilisé très partiellement pour ajuster la réactivité du cœur
L'essentiel du sel est réinjecté dans la couverture sans retraitement complémentaire

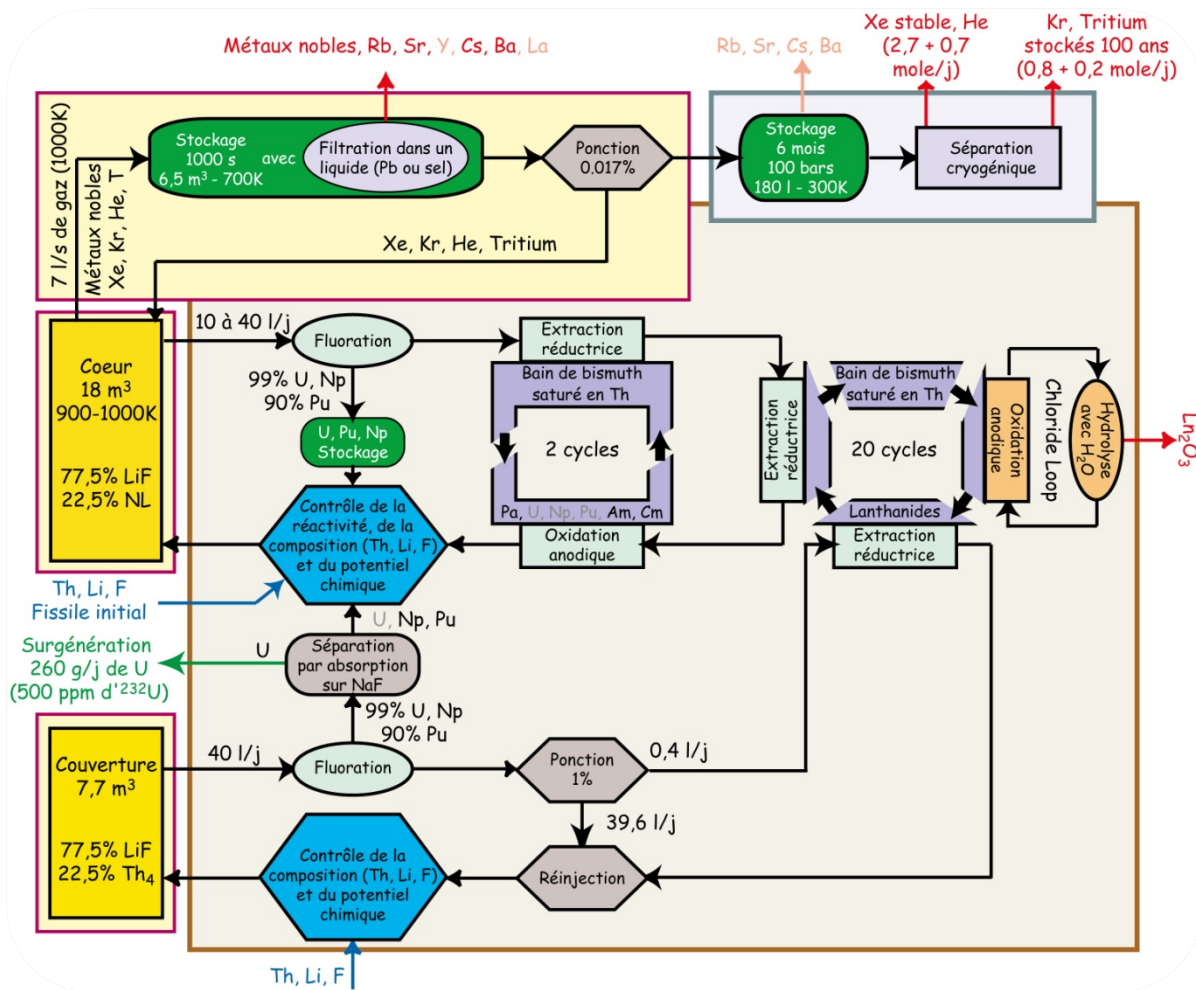
1% de ce sel va subir un retraitement plus poussé pour extraire les traces de lanthanides

En continu, un flux de gaz dans le cœur et dans la couverture fertile permet d'extraire les produits de fission gazeux et non solubles

Le gaz est dans un premier temps stocké et lessivé pendant 1000 s avant d'être réinjecté dans le cœur

Les particules solides sont alors piégées

0,017% du gaz va subir un retraitement plus poussé pour séparer les Xe, Kr et autres gaz et pour attendre la fin de leur décroissance



Influence du retraitement sur le fonctionnement du réacteur

A priori, le retraitement sert à nettoyer le sel combustible des noyaux neutrophages

Plus le retraitement sera lent, plus ces noyaux neutrophages vont s'accumuler et plus il sera difficile d'obtenir la régénération

Il n'est pas utile de retraiter plus de 100 l/j
En dessous de 10 l/j on perd la régénération

L'efficacité du bullage n'a pas d'influence sur la régénération

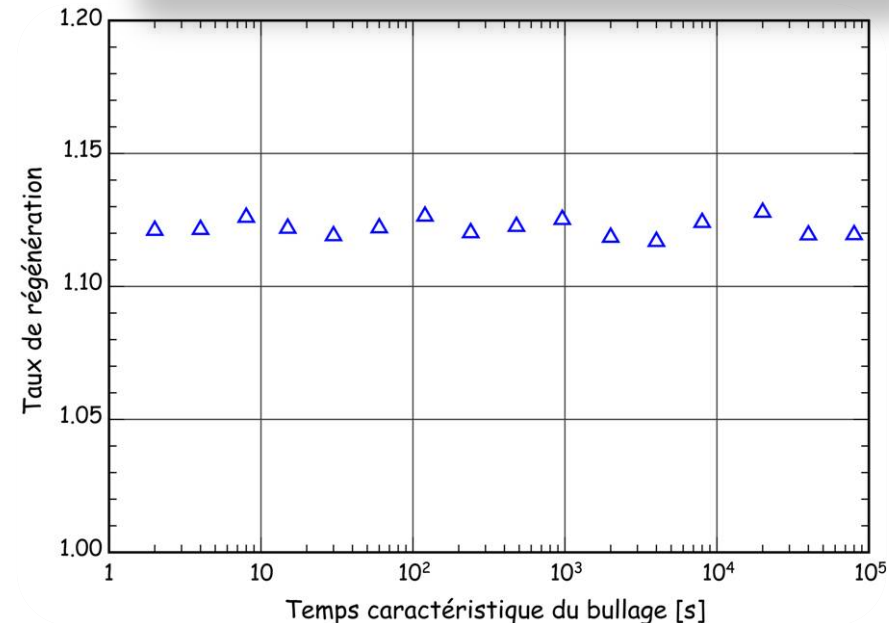
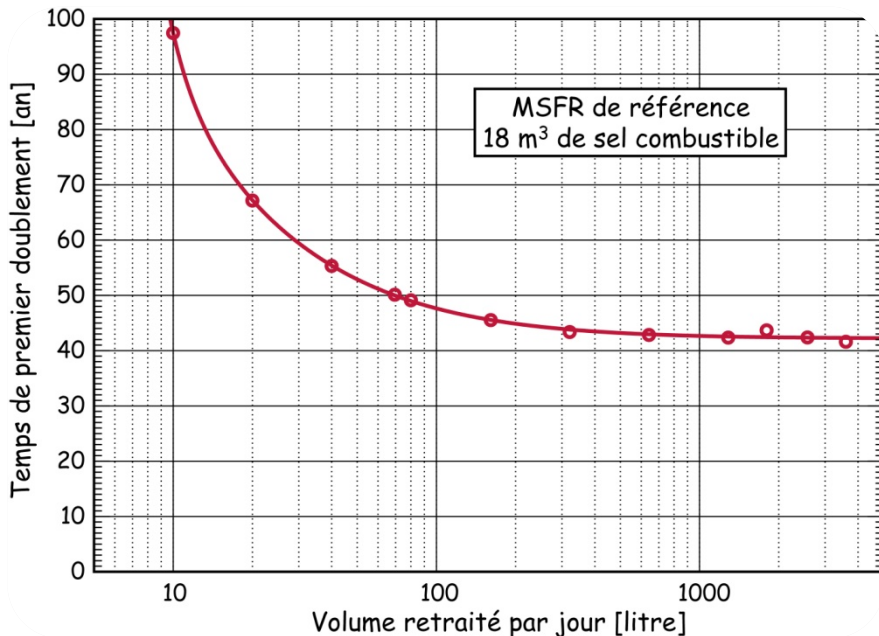
Le vrai rôle du retraitement est de maintenir les propriétés physico-chimiques du sel

Éviter les dépôts d'éléments non solubles

Contrôler la corrosion

Limiter l'abrasion et l'érosion des matériaux de structure

On profite pleinement des avantages d'un spectre neutronique rapide



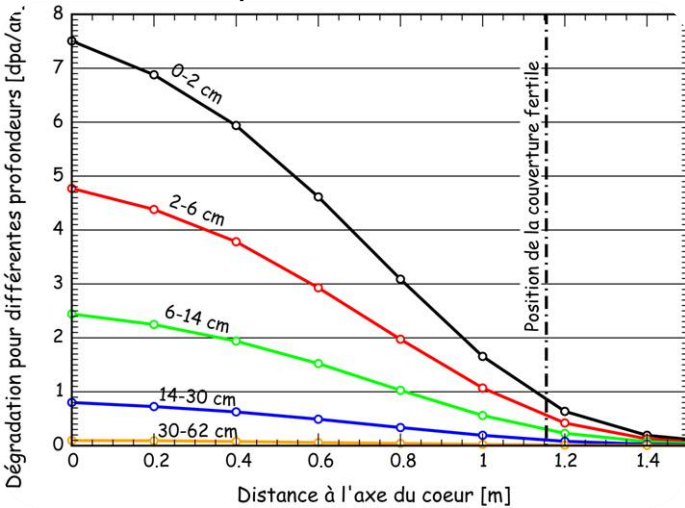
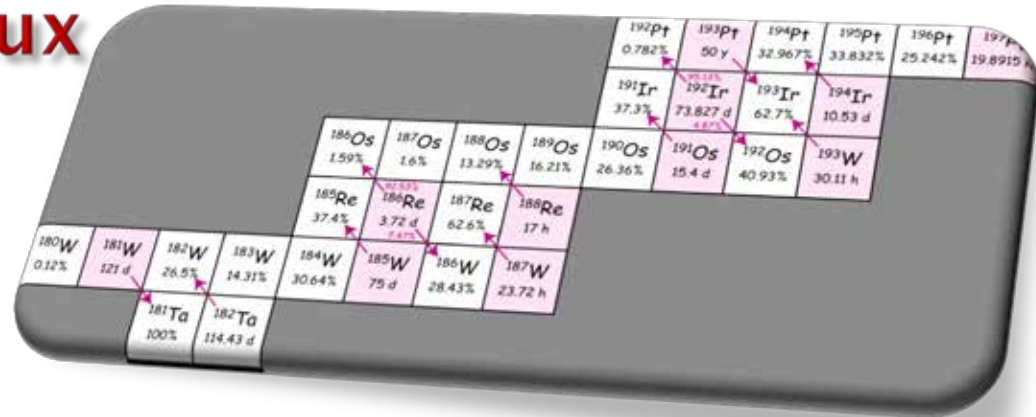
Dégâts aux matériaux

Il n'y a pas d'élément de structure dans le cœur

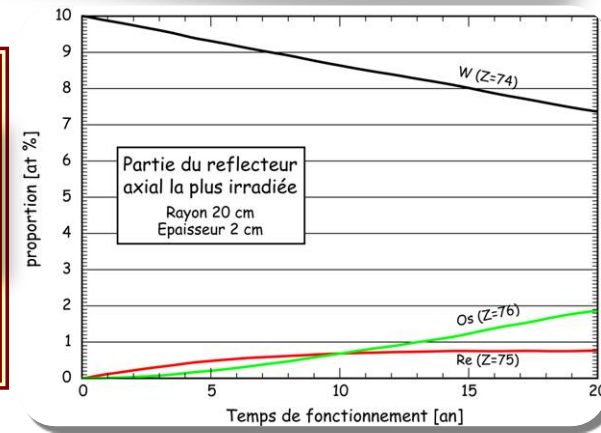
Les matériaux les plus exposés sont

Les réflecteurs axiaux

Les parois internes de la couverture fertile



Composition du NiWCr [%at]					
Ni	79,43	Ti	0,295	B	0,033
W	9,976	C	0,294	P	0,023
Cr	8,014	Mn	0,257	S	0,004
Mo	0,736	Si	0,252		
Fe	0,632	Al	0,052		



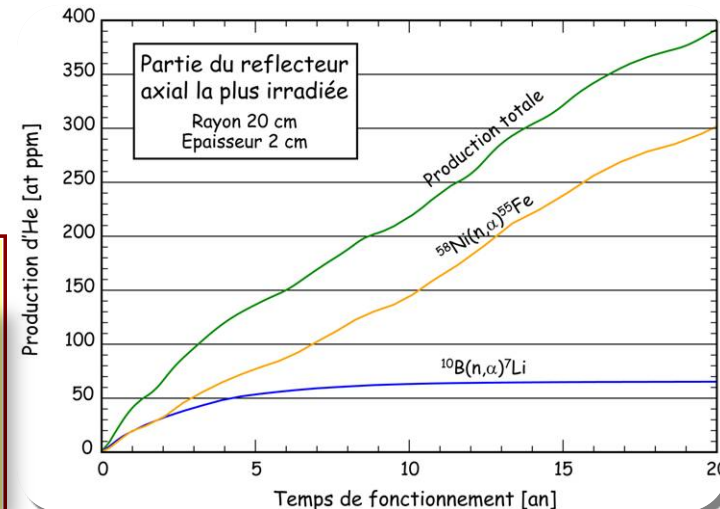
Les dégradations sont dues

Aux déplacements par atome (7,5 dpa/an au max)

À la production d'hélium

À la capture neutronique sur le tungstène

À l'activation



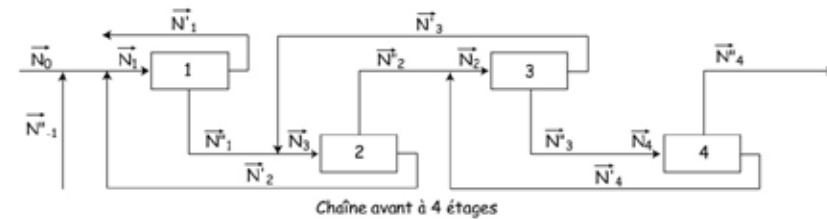
Isotopes activés dans le NiWCr

	T _{1/2}	At/cm ³	Décroissance		T _{1/2}	At/cm ³	Décroissance
⁵⁹ Ni	76000	2,97 10 ²⁰	CE	⁹³ Mo	3012	2,85 10 ¹⁸	CE+88% 31 keV
⁶³ Ni	99	3,56 10 ¹⁹	b- 67 keV	⁹³ Nb	16	1,75 10 ¹⁵	TI 31 keV
⁹⁹ Tc	211300	1,26 10 ¹⁹	b- 294 keV	³ H	12	1,23 10 ¹⁵	b- 19 keV

Capacité d'appauvrissement du nickel en $^{58,60}\text{Ni}$

Les sections efficaces (n,α) des différents isotopes du nickel sont très variables

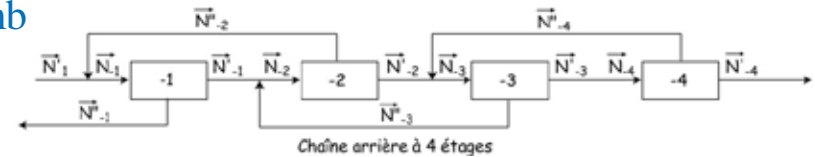
^{58}Ni (68,077%)	0,58 mb
^{60}Ni (26,223%)	0,09 mb
^{61}Ni (1,140%)	0,15mb
^{62}Ni (3,634%)	0,003 mb
^{64}Ni (0,926%)	0,00055 mb



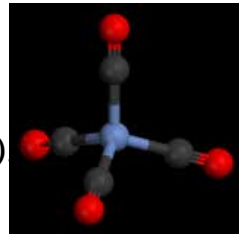
Pour une section efficace (n,α) moyenne de 0,393 mb

Il faut surtout réduire la proportion de ^{58}Ni

Attention la section efficace (n,α) du ^{59}Ni dont la période est de 76 000 ans est très importante, or il peut être produit par ($n,2n$) sur le ^{60}Ni



En utilisant du nickel carbonyle ($\text{Ni}(\text{CO})_4$ dont la température d'évaporation est de $43\text{ }^\circ\text{C}$) une cascade de 60 centrifugeuses (30 + 30) et en produisant 5% de nickel enrichi en isotopes lourds et donc 95% de nickel appauvri

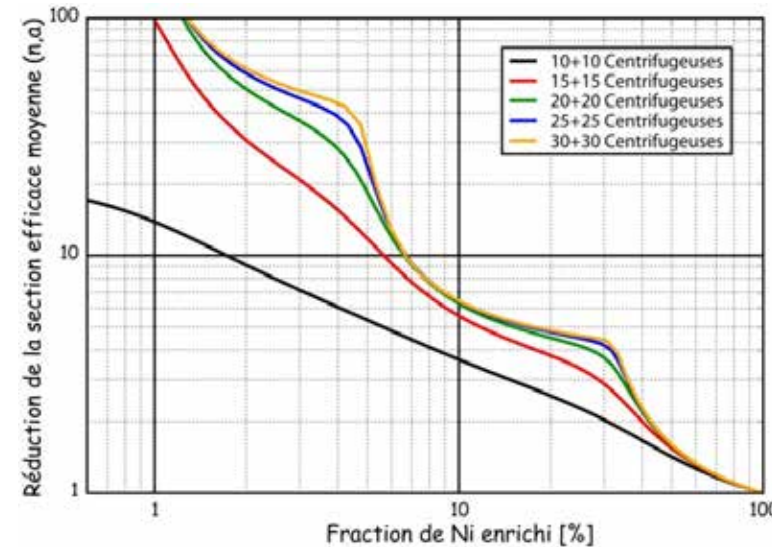


La composition obtenue est la suivante

^{58}Ni (0,094%)	0,58 mb
^{60}Ni (7,009%)	0,09 mb
^{61}Ni (3,304%)	0,15mb
^{62}Ni (71,079%)	0,003 mb
^{64}Ni (18,514%)	0,00055 mb

La section efficace (n,α) moyenne est de 0,014 mb

Soit une réduction d'un facteur proche de 30



Disponibilité de la matière fissile

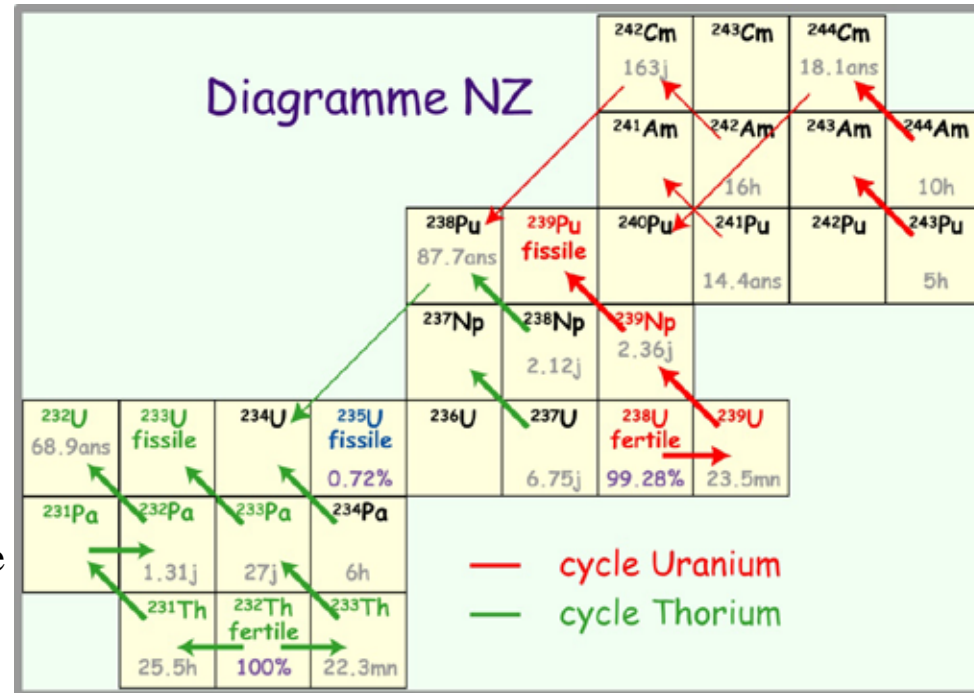
Pour tout réacteur nucléaire, on a besoin de matière fissile pour le démarrer

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}U pour démarrer de nouvelles filières

Pour démarrer une filière Th-U on peut donc envisager 3 solutions :

Démarrer directement à l' ^{235}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}U dans les REP actuels pour démarrer directement à l' ^{233}U

On peut aussi faire un mix de ces solutions...

Le MSFR démarré avec les TRU des REP actuels

Sel initial : 77,5% ${}^7\text{LiF}$ - 20% ThF_4 , -2,5% ${}^{233}\text{UF}_4$
Température du sel combustible : 650 à 750 °C
Température maximum des parois : 700 °C
Puissance : 3 GW_{th} (1,4 GW_{el})

Inventaire initial de Pu par réacteur : 11 200 kg
Inventaire initial de Pu par GW_{el} : 7 470 kg

Volume de sel combustible : 18 m^3
1/2 dans le cœur
1/2 dans les échangeurs et tuyaux

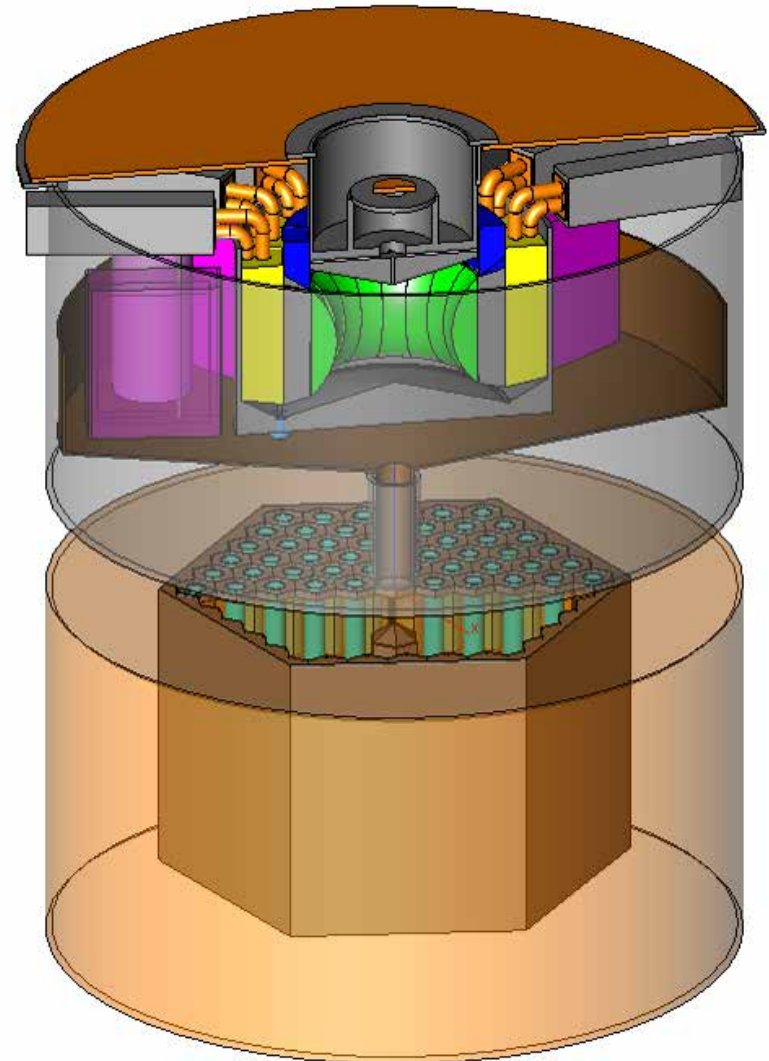
Retraitement du cœur : 10 à 40 l/j

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

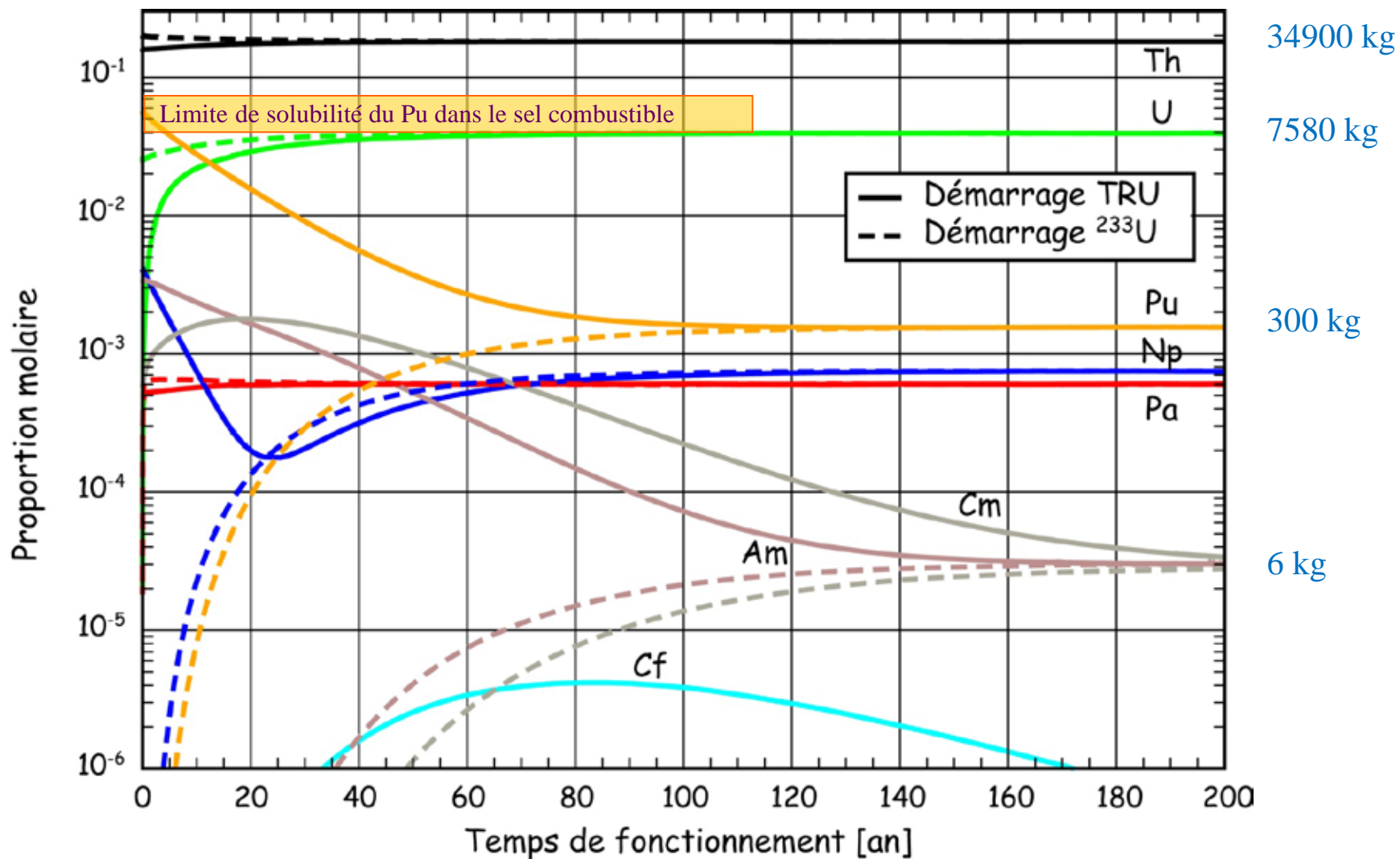
Epaisseur de la couverture fertile : 50 cm
Volume de la couverture : 7,3 m^3
Sel de la couverture : 77,5% ${}^7\text{LiF}$, -22,5% ThF_4
Retraitement de la couverture : 40 l/j

Coefficient de contre réaction: de -3,9 à -4,9 pcm/K
Densité : de -3,1 à -3,4 pcm/K
Doppler : de -0,8 à -1,4 pcm/K

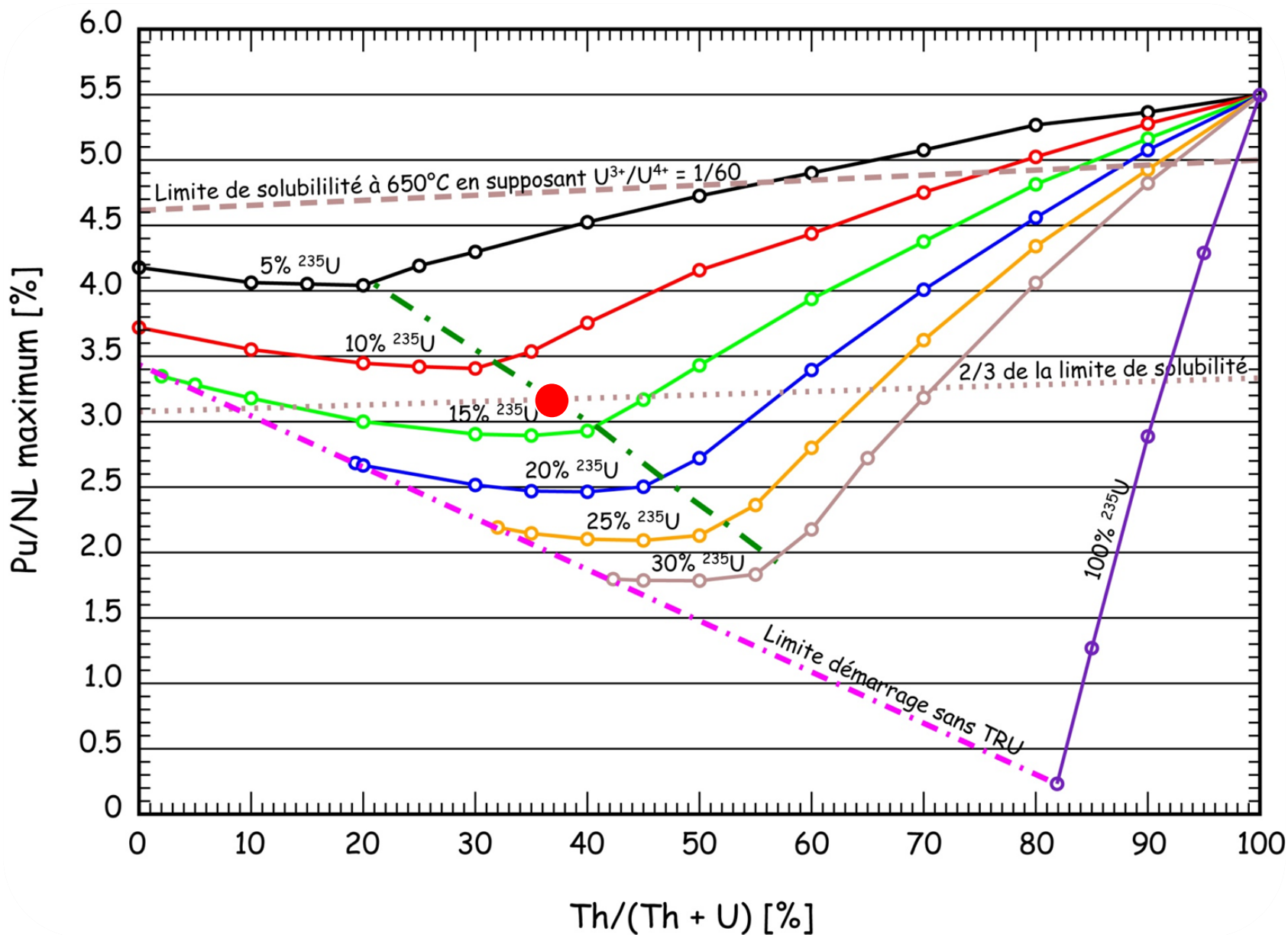
Production d' ${}^{233}\text{U}$: 200 kg/an pendant 20 ans puis 95 kg/an
Temps de premier doublement : 30 ans



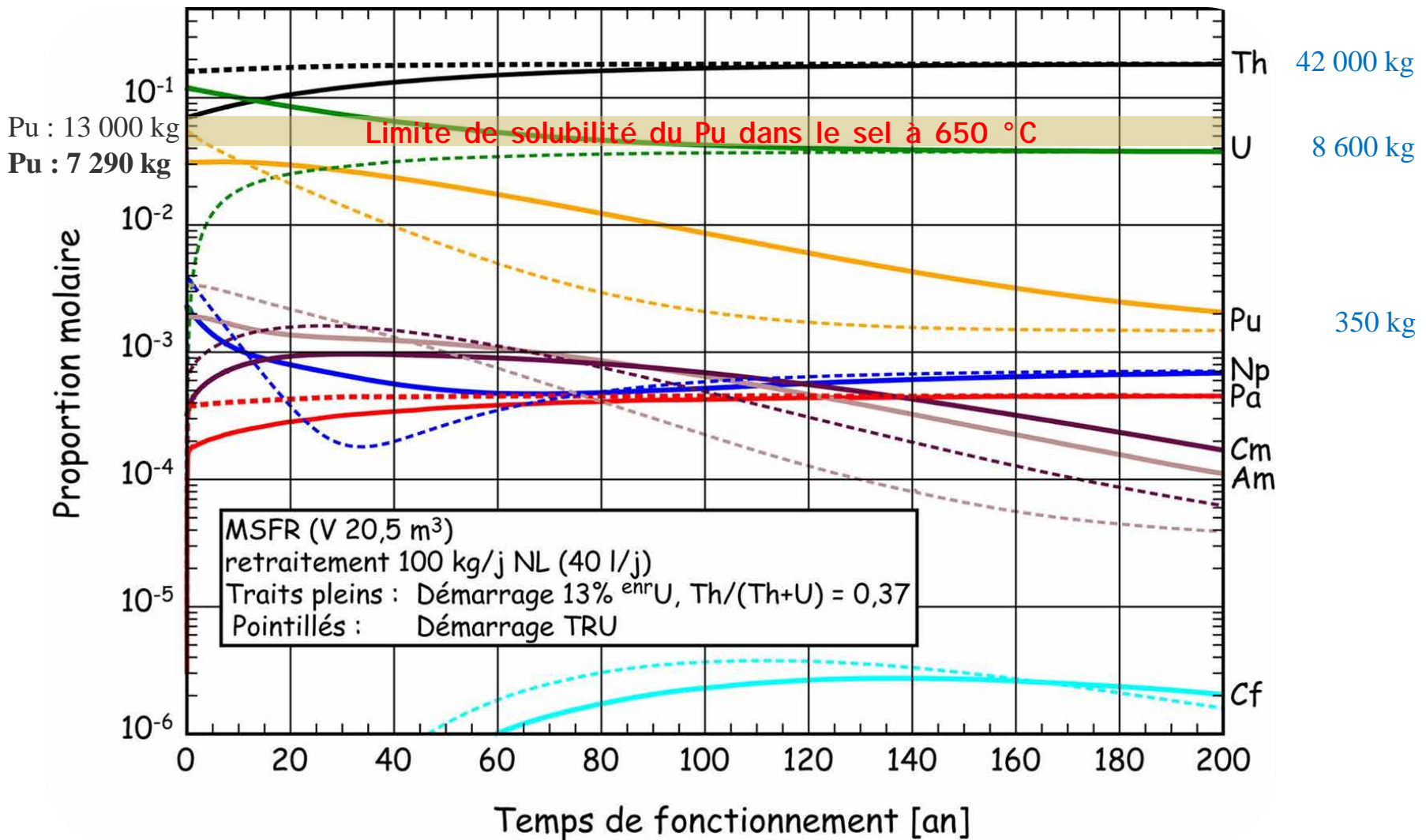
Évolution du combustible (démarrage TRU et ^{233}U)



Démarrage de la filière Th-²³³U avec de l'enrU et des TRU issus des REP



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



La fin de jeu (réduction de l'inventaire final)

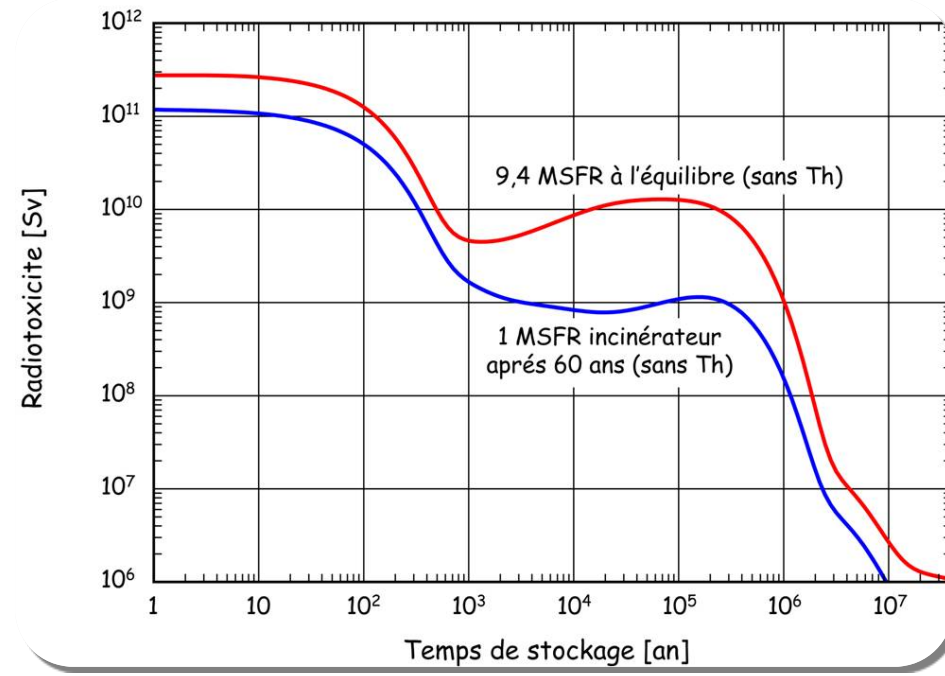
Si, lors du retraitement du combustible, les rejets en actinides sont de 0,1% et que le volume du cœur est retraité en 5 ans, alors l'inventaire en actinides est supérieur aux rejets pendant au moins 5000 ans

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 9,4 MSFR en 60 ans

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

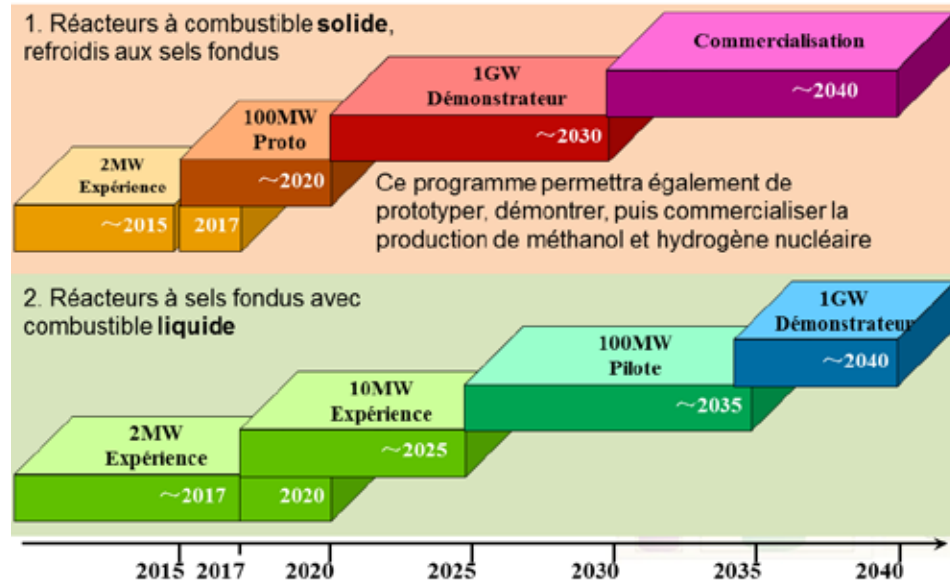


Les réacteurs à sels fondus à l'international

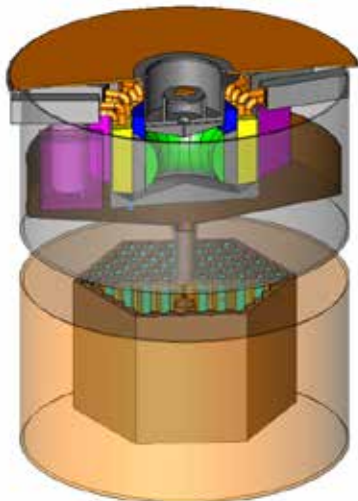


Les réacteurs à sels fondus donnent lieu à plusieurs projets récents dans le monde

- Chine (TMSR)
- Royaume-Uni (SSR)
- Europe (MSFR)
- Canada (IMSR)

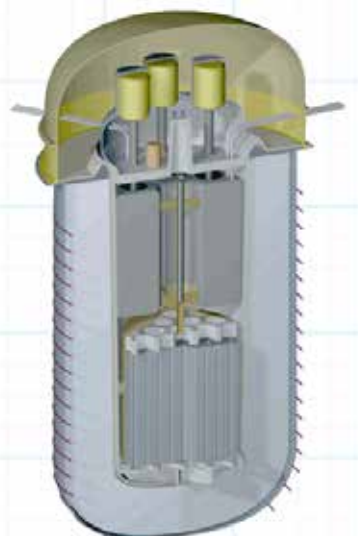


MSFR-SAMOFAR
Europe 2015-2019



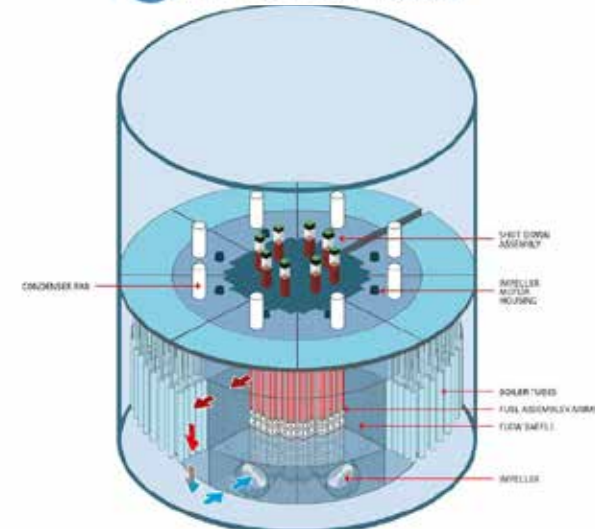
Molten Salt Fast Reactor

TERRESTRIAL ENERGY



Integral Molten Salt Reactor

moltex energy
safer, cheaper, nuclear



Stable Salt Reactor

Bilan actuel

Nous disposons d'un concept satisfaisant l'ensemble des critères pour un réacteur de 4^{ème} génération

Économie des ressources

Régénération

Sûreté accrue

Tous les coefficients de contre réaction sont dans le vert

Minimisation de la production de déchets

Recyclage des actinides

Prise en compte des actinides du cycle actuel

Réduction de l'inventaire final

Résistance à la prolifération

C'est un avantage intrinsèque au cycle Th/U

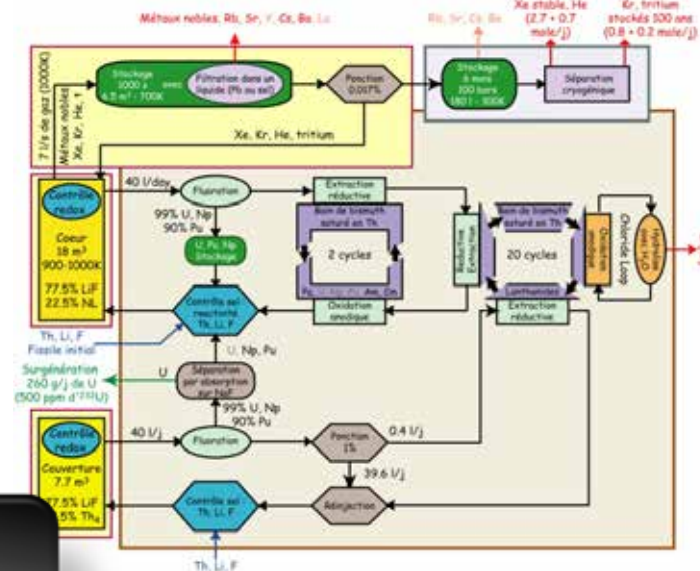
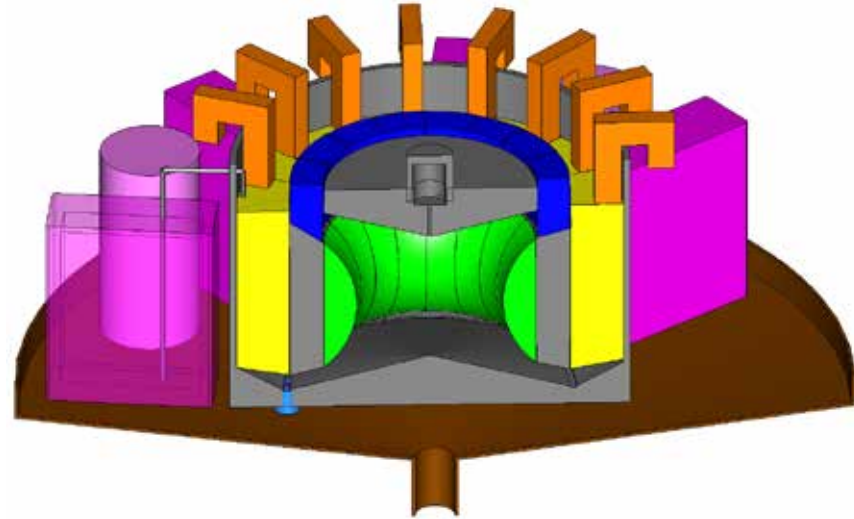
Compétitivité économique

La simplification de tous les systèmes assure une réduction des coûts par rapport au MSBR

L'évaluation par rapport à d'autres filières reste à faire

Il s'avère que tous ces acquis sont très robustes par rapport aux évolutions inévitables pour résoudre les problèmes pouvant apparaître dans la suite des études

Jusqu'à présent, tous les problèmes rencontrés ont trouvé plusieurs solutions, souvent complémentaires, et qui n'affectent pas les caractéristiques principales du concept



Le cycle Th-U est la seule alternative au cycle U-Pu

Le thorium est bien adapté aux combustibles de type fluorure

Les fluorures développent tout leur potentiel avec le thorium

Avez-vous des questions ?



Pour une présentation semblable sur internet :

<http://www.youtube.com/watch?v=M4MgLixMrz8> (Sous YouTube tapez "Thorium")

Pour plus d'informations :

<http://lpsc.in2p3.fr/index.php/fr/38-activites-scientifiques/physique-des-reacteurs-nucleaires/183-msfr-bibliographie> (Sous Google tapez "MSFR LPSC")