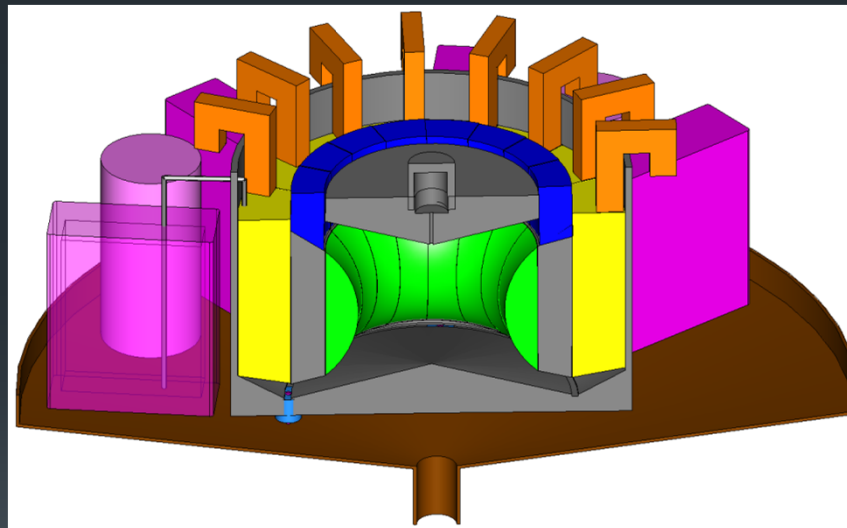




# Réacteur nucléaire à combustible liquide le MSFR

vers un nucléaire "socialement acceptable"



Daniel Heuer

Directeur de recherche au CNRS

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie

[Daniel.heuer@lpsc.in2p3.fr](mailto:Daniel.heuer@lpsc.in2p3.fr)

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

Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Pouvoir déployer des milliers de réacteurs dans le monde



Il doit être socialement acceptable et pérenne

- Économie des ressources
  - Le réacteur doit être proche de la régénération
    - Cela impose que le combustible soit retraité régulièrement
- Sûreté optimale
  - Il ne doit jamais être nécessaire d'évacuer les populations vivant à proximité du réacteur ce qui 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, s'il n'y a pas de risque de sur accident
- 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
- Résistance à la 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

# Réacteurs nucléaire à combustible liquide

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

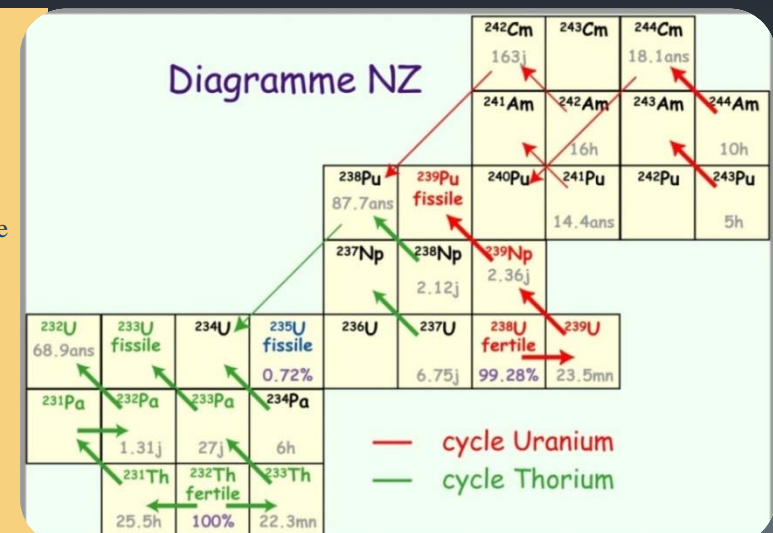
Réacteurs à sels fondus

Les propriétés neutroniques du fluor sont défavorables au cycle uranium  
La solubilité du plutonium dans les fluorures est limitée

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

Cycle Thorium



# 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  $2,5 \text{ MW}_{\text{th}}$  en 1954

- Le Molten Salt Reactor Experiment (MSRE)

- Démonstrateur de RSF

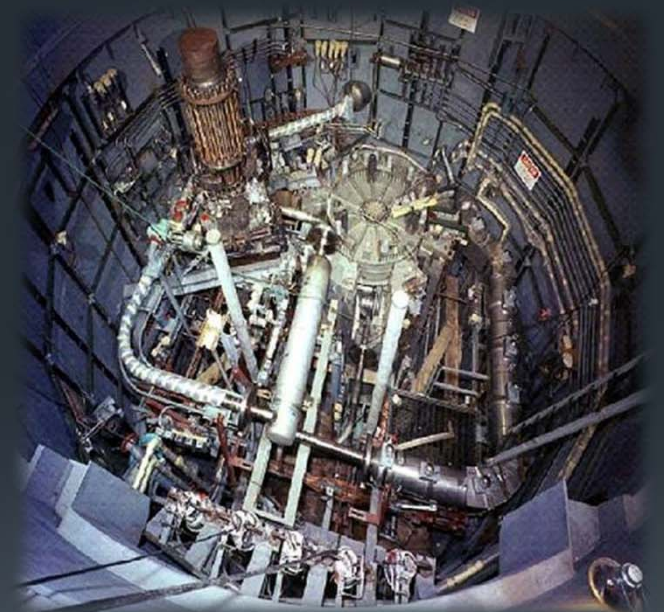
- Il a fonctionné 5 ans à  $8 \text{ MW}_{\text{th}}$
      - De 1965 à 1968 à l'Uranium enrichi à 30%
      - De 1968 à 1969 au Plutonium
      - En 1969 à l'Uranium 233

- Le Molten Salt Breeder Reactor (MSBR)

- Projet de réacteur industriel en cycle Thorium de  $2500 \text{ MW}_{\text{th}}$
    - Recherche d'une surgénération maximum
    - Arrêt du projet en 1976

- Les projets sur les RSF ont ensuite repris

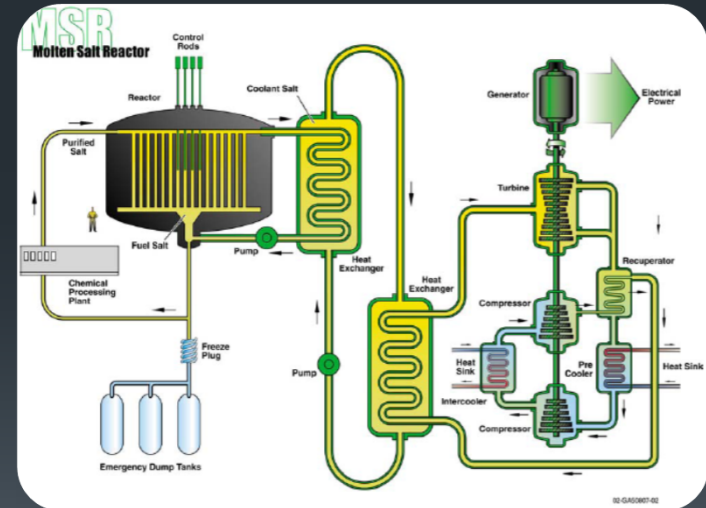
- Japon depuis les années 80
  - France CEA et EDF dans les années 90 et 2000
  - France CNRS depuis les années 2000
  - Russie depuis les années 90
  - USA dans les années 90
  - Tchéquie depuis les années 2000
  - Chine depuis 2011



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

# 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

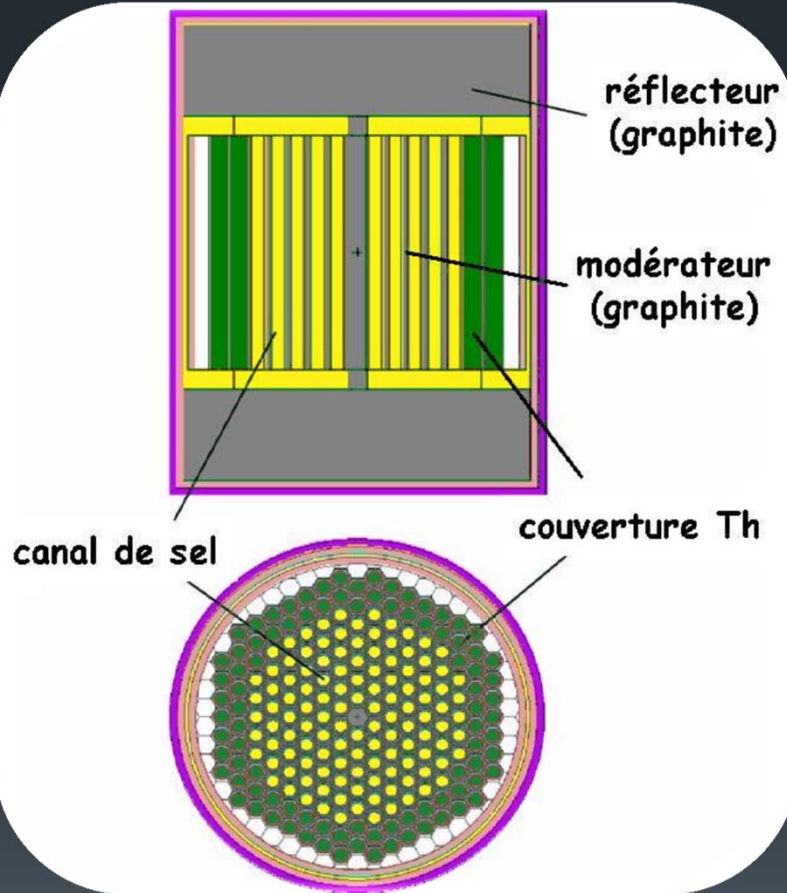


Globalement le MSBR n'a pas les capacités à devenir un réacteur industriel

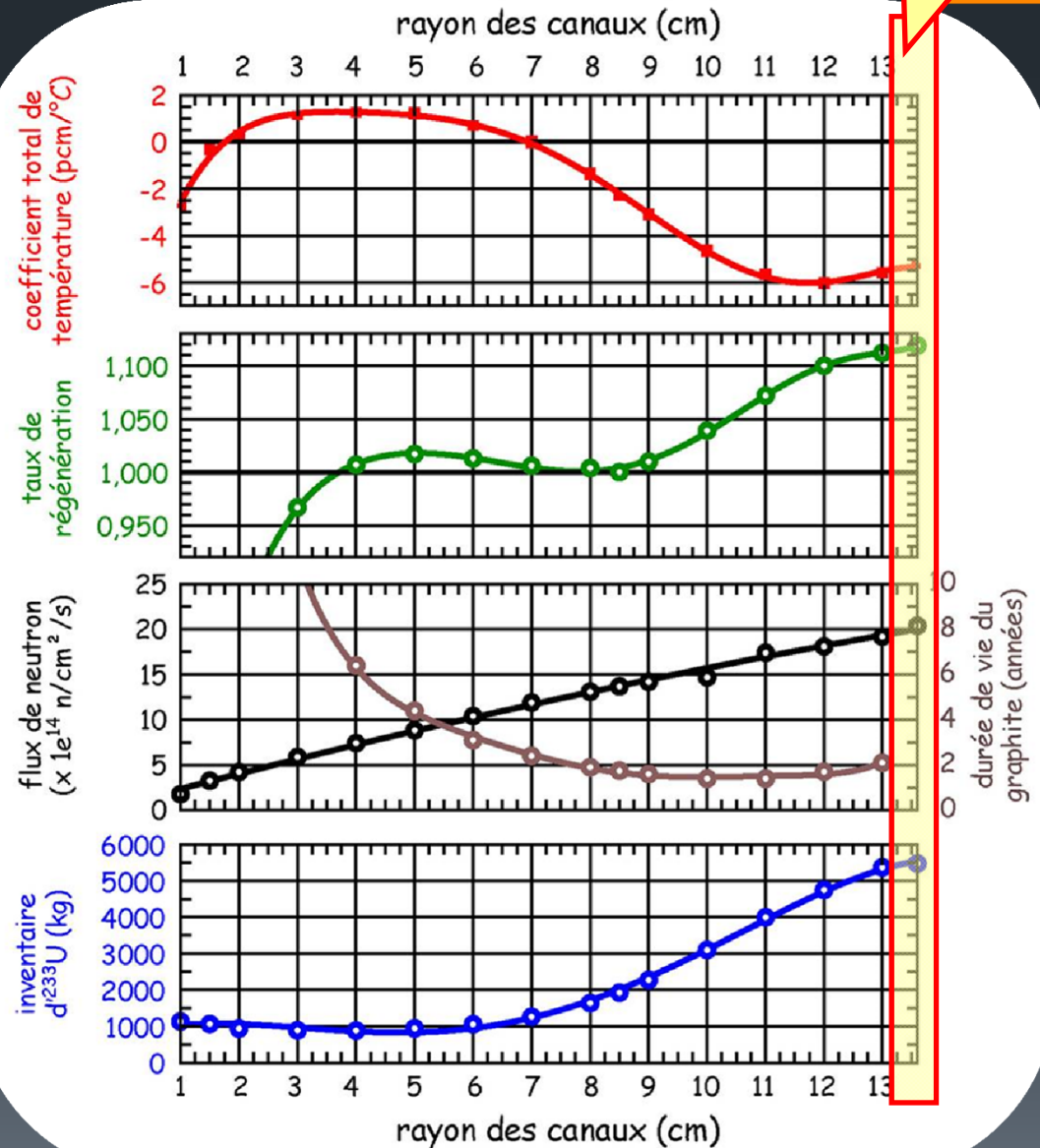
Les avantages intrinsèques d'un combustible liquide restent pourtant très attrayants

# Du MSBR (Molten Salt Breeder 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 MWth).*

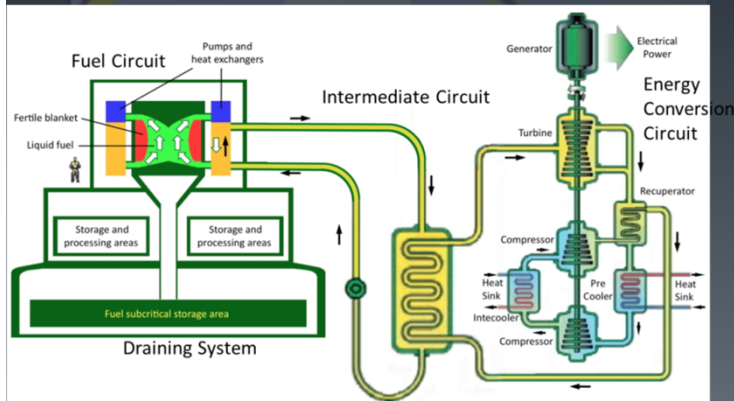
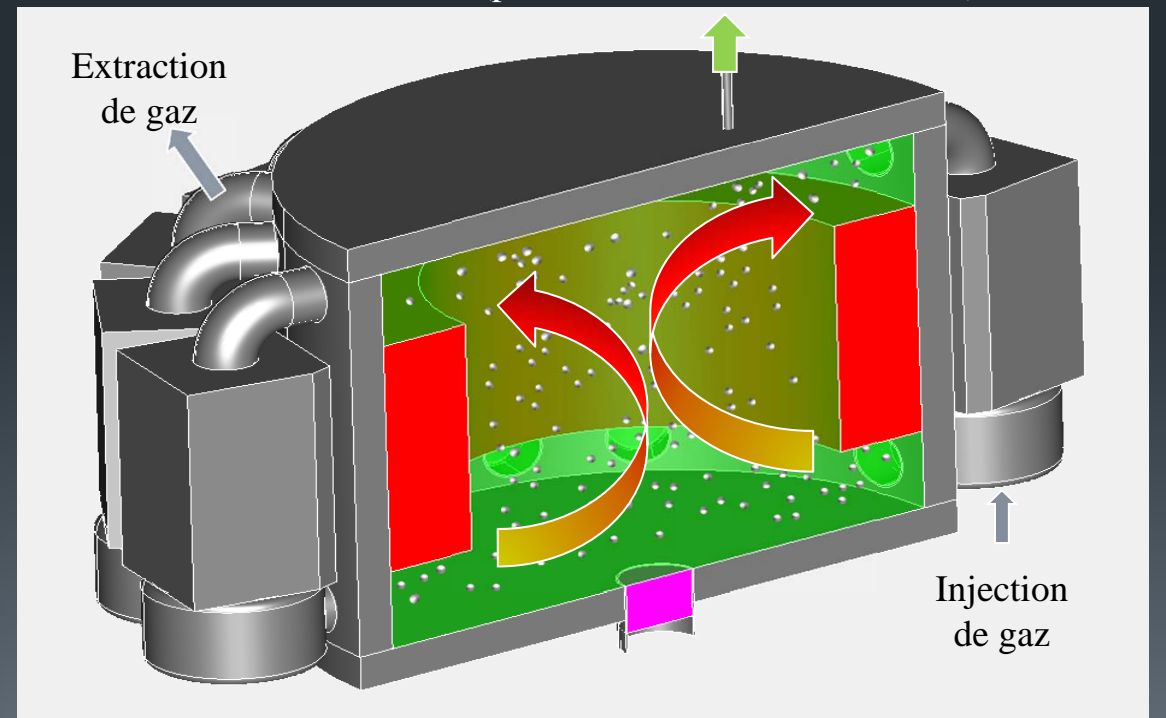
# Le MSFR et le forum international GEN IV



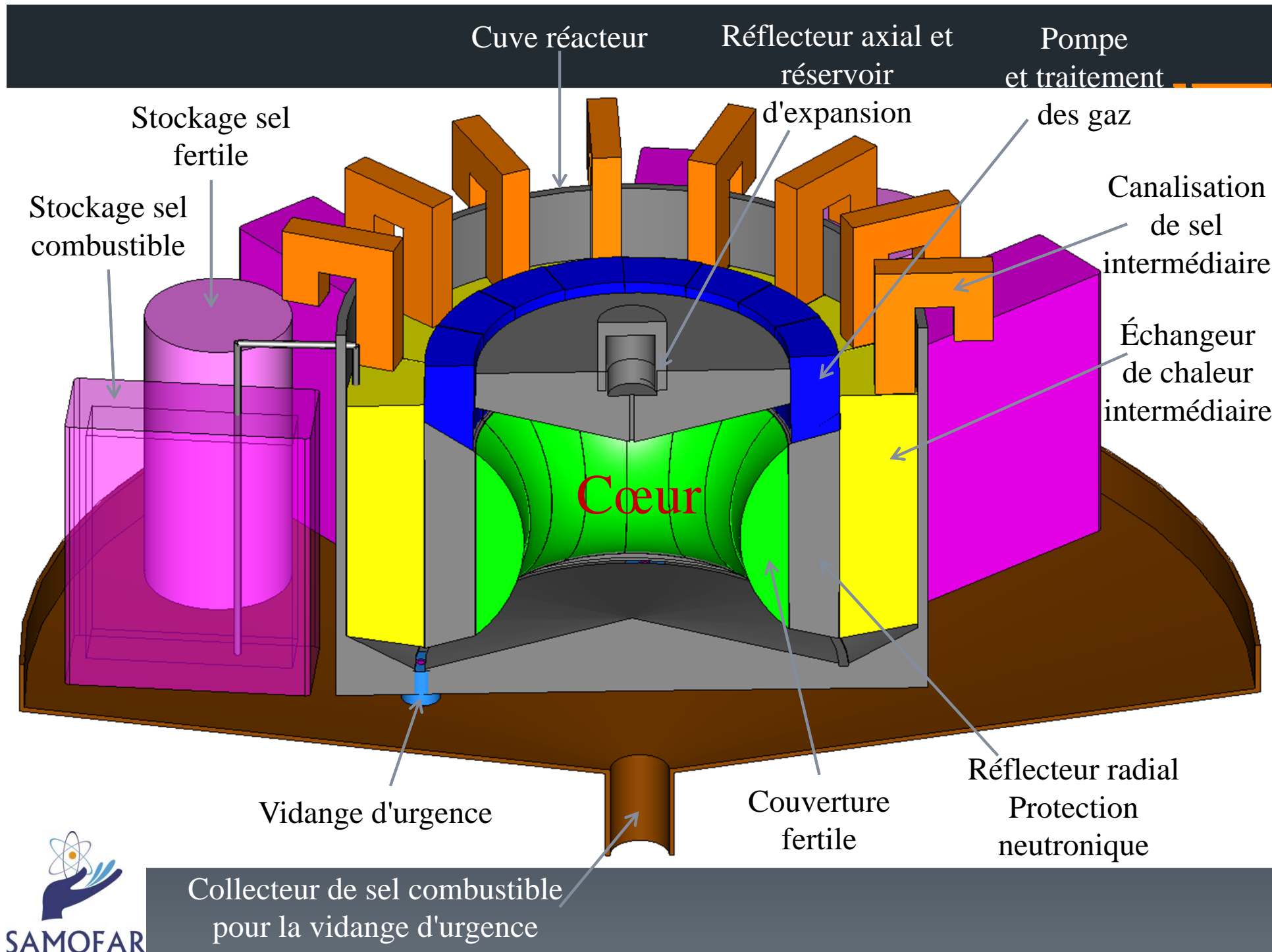
- Le forum international GEN IV dans le cadre du "MSR Steering Committee" a validé ce concept de réacteur à sels fondus en spectre rapide en lui donnant le nom de "MSFR"
- Ce choix a été entériné par le "Policy Group" en 2008
- Les aspects technologiques spécifiques doivent être investigués
- Une approche de sûreté spécifique doit être établie

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

Extraction  
de gaz

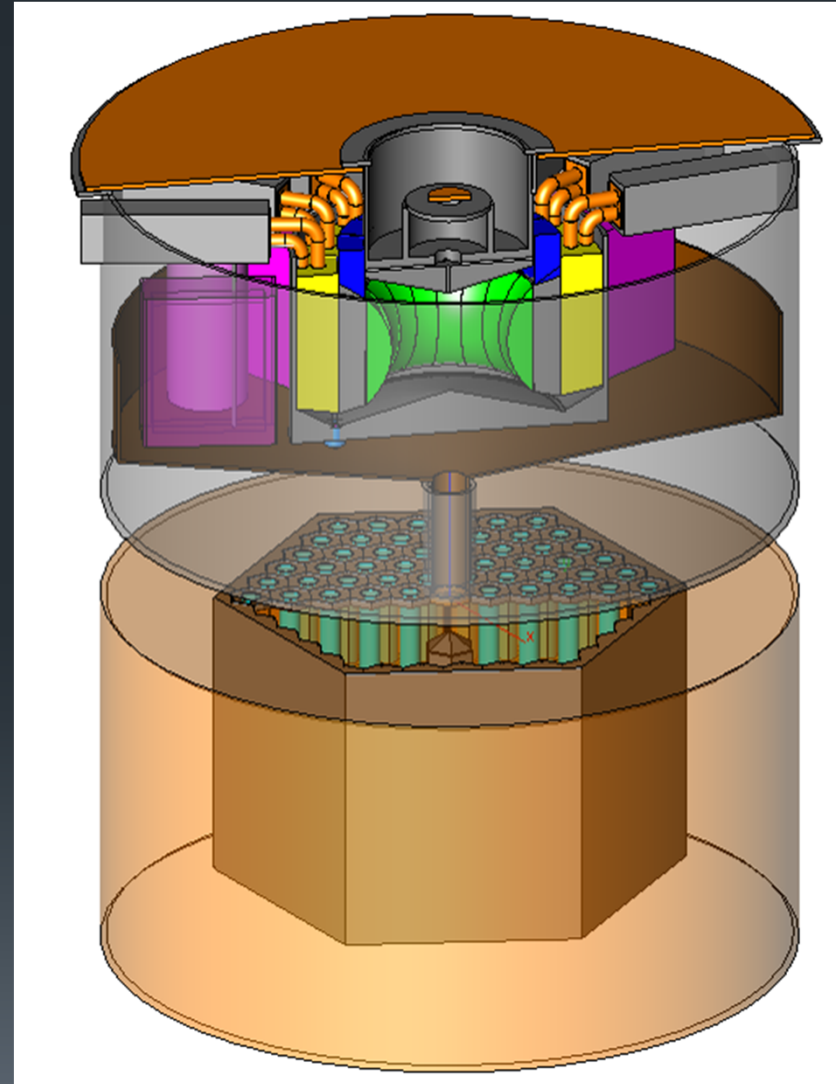




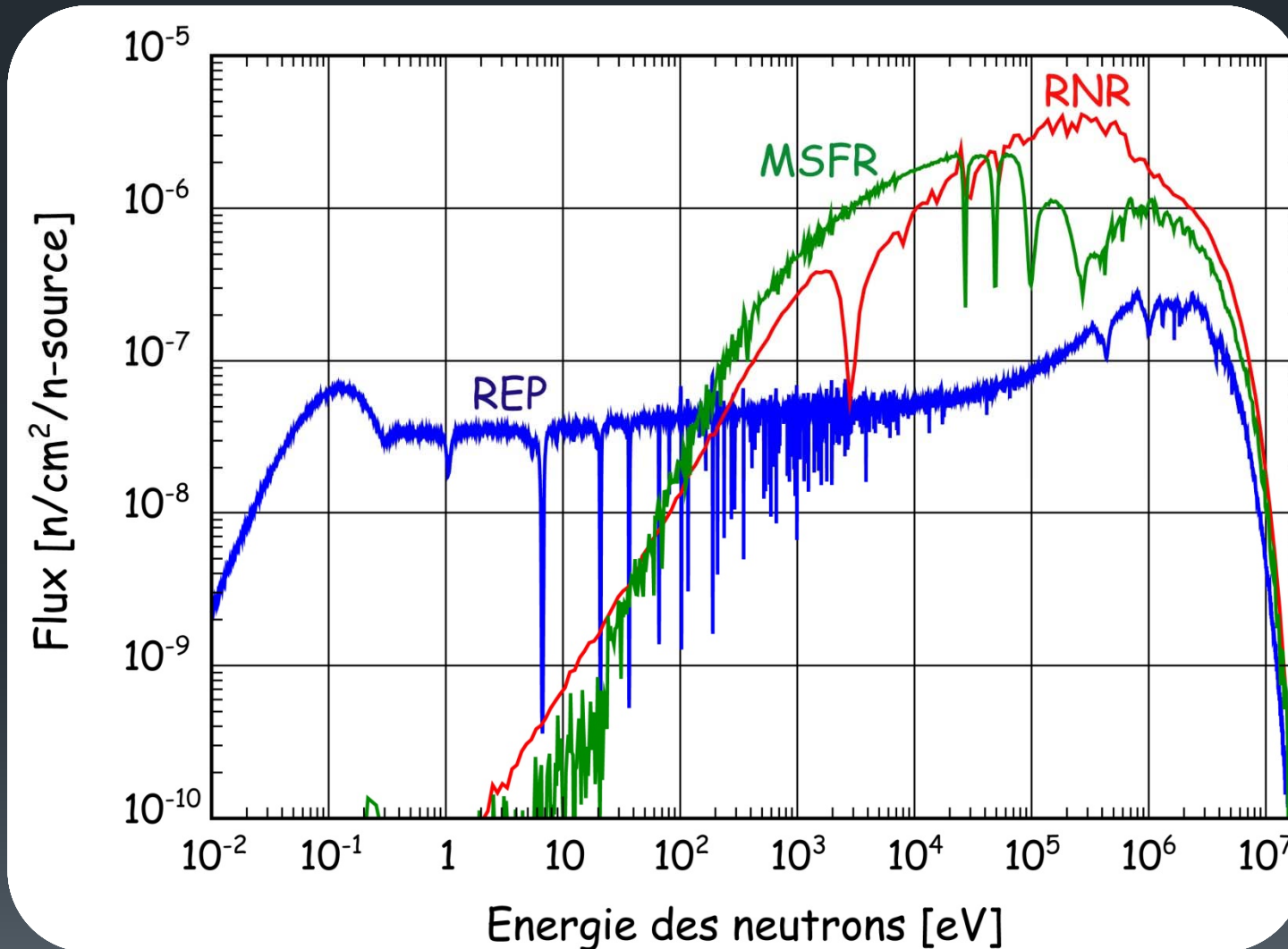


# Le MSFR de référence

- Sel initial : 77,5%  $^7\text{LiF}$ - 20%  $\text{ThF}_4$ ,-2,5%  $^{233}\text{UF}_4$
- Température du sel combustible : 650 à 750 °C
- Température maximum des parois : 700 °C
- Puissance : 3  $\text{GW}_{\text{th}}$  (1,4  $\text{GW}_{\text{él}}$ )
  
- Inventaire initial d' $^{233}\text{U}$  par réacteur : 5060 kg
- Inventaire initial d' $^{233}\text{U}$  par  $\text{GW}_{\text{él}}$  : 3610 kg
  
- Volume de sel combustible : 18  $\text{m}^3$ 
  - 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  $\text{m}^3$
- Sel de la couverture : 77,5%  $^7\text{LiF}$ ,-22,5%  $\text{ThF}_4$
- 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



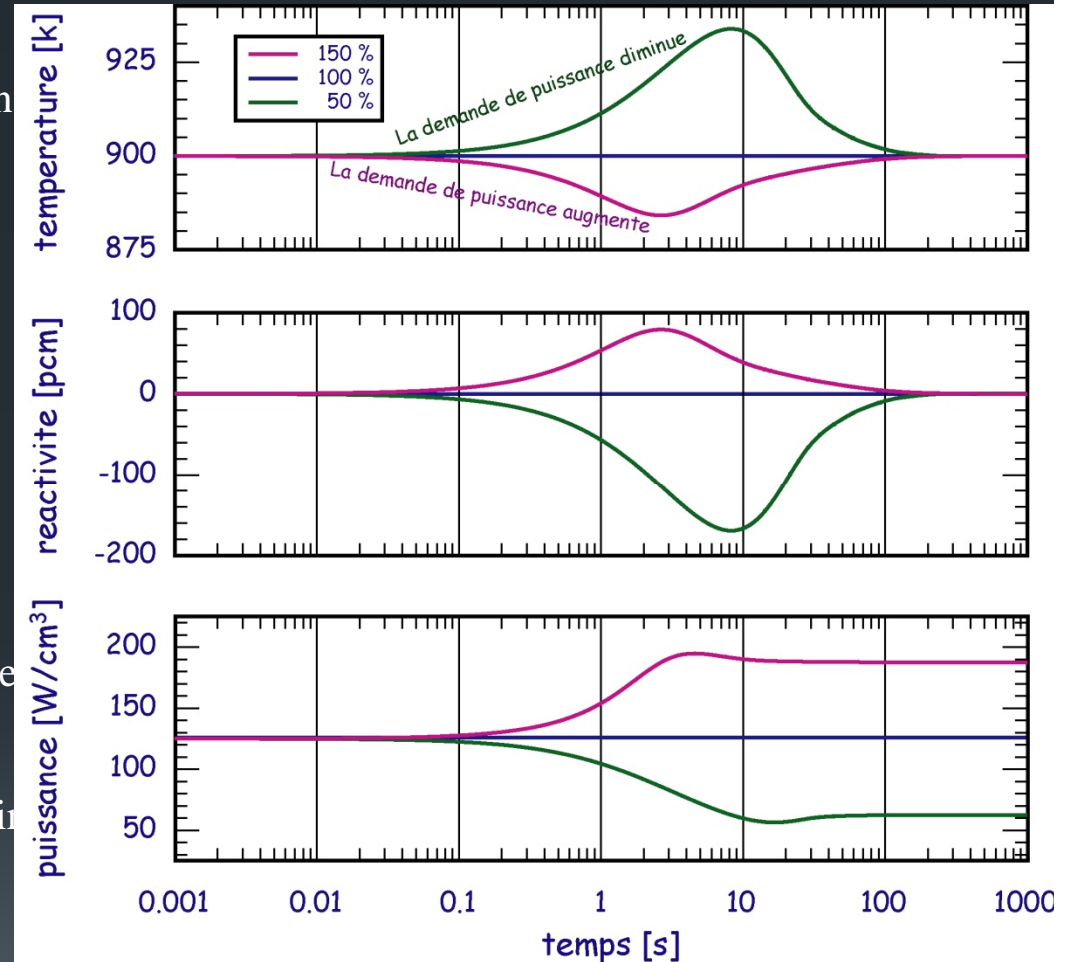
# Les spectres neutroniques MSFR, REP et RNR



Moins de Neutrons rapides = moins de dégâts aux matériaux

# Comment piloter un réacteur par la demande ?

- 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

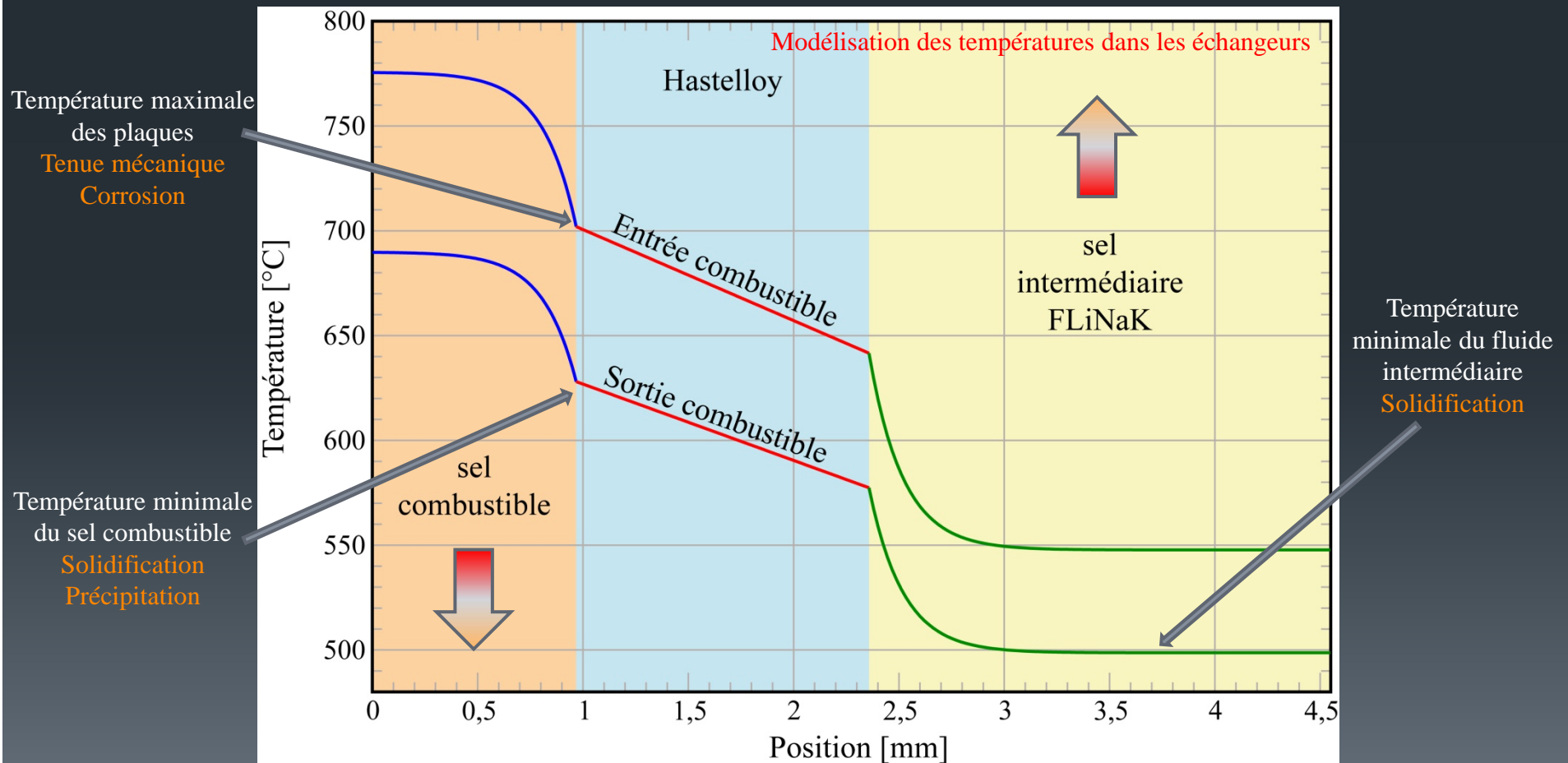


La réactivité finit toujours par revenir à son niveau de prédilection c'est-à-dire 0

Sauf si la température devient trop élevée et finit par détruire le cœur du réacteur

# Les températures extrêmes

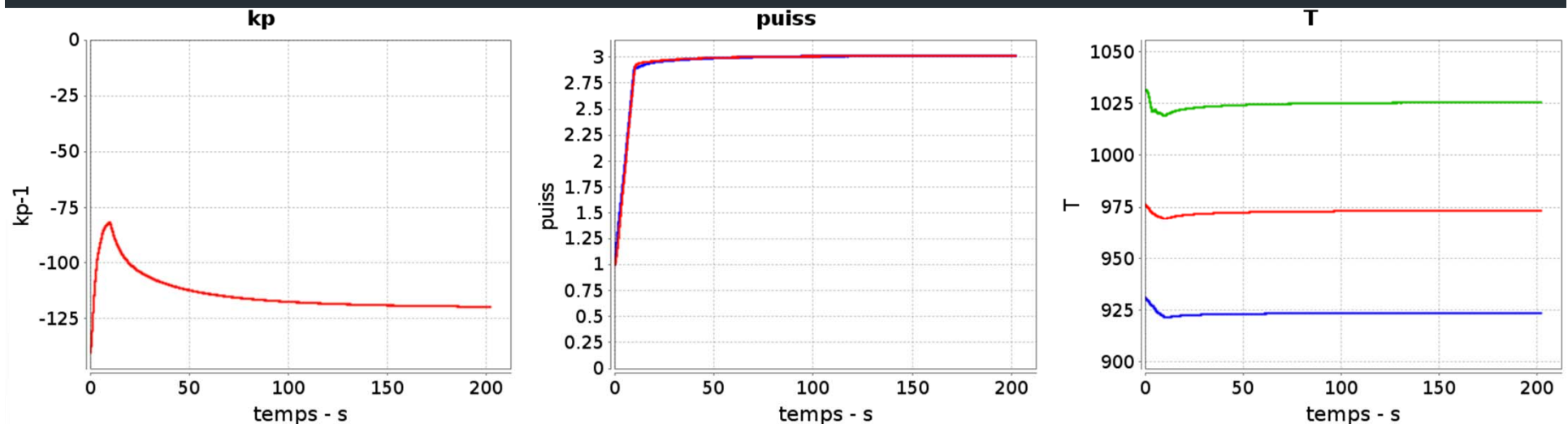
- Tous les éléments de structure peuvent être protégés thermiquement
  - Sauf les échangeurs de chaleur
    - On suppose des échangeurs à plaques
    - La faible conductivité thermique des sels protège les plaques
      - Certaines températures sont critiques



# 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

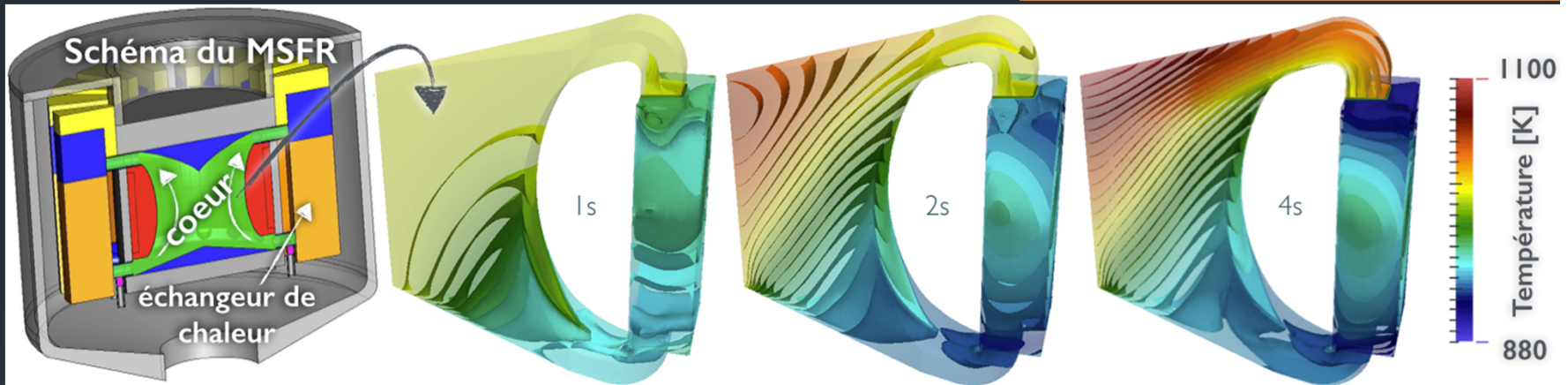


# Accident de sur-refroidissement

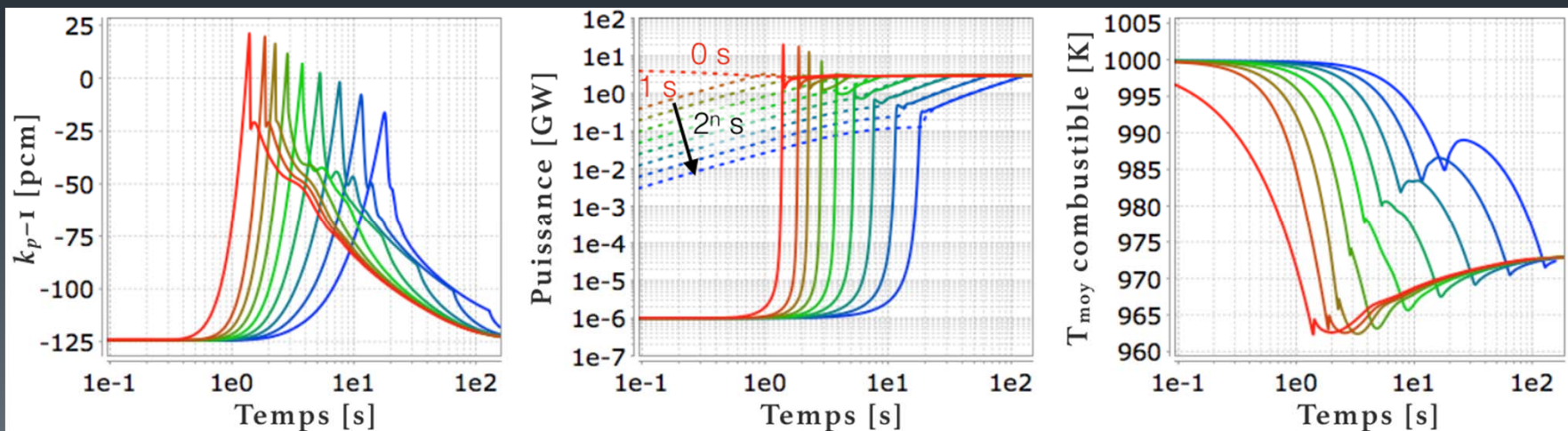
- L'extraction de puissance passe de 1 kW à 3 GW
  - Si le transitoire se produit en moins d'une minute, le cœur atteint la criticité prompte
    - Il faudrait réaliser une étude précise de thermomécanique pour évaluer les conséquence d'un tel transitoire
  - Si le transitoire est plus lent (inertie 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

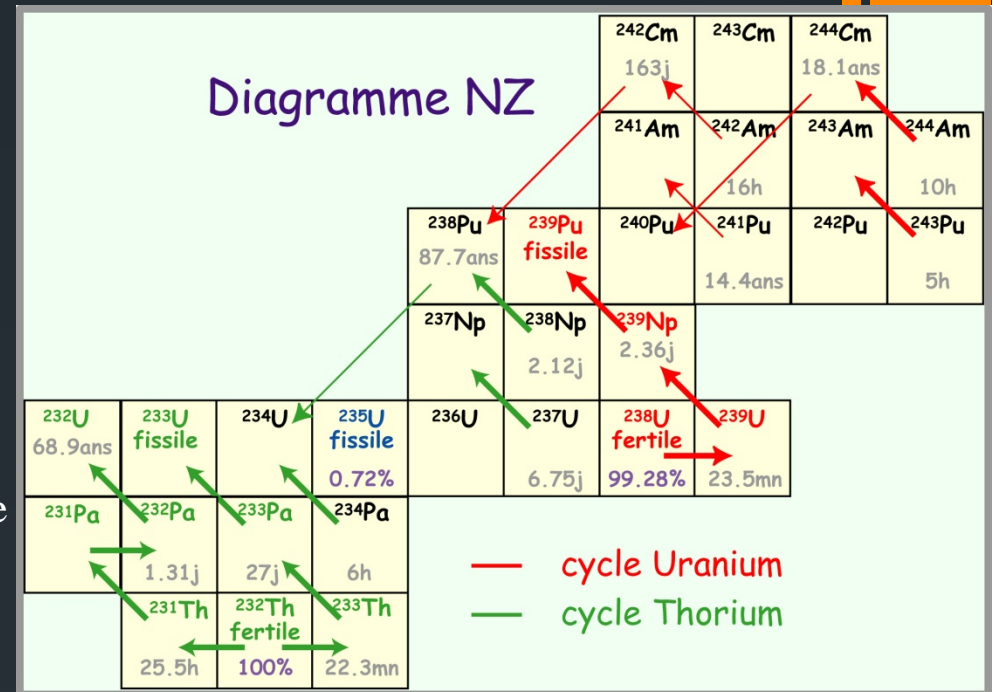


Sur-refroidissement en 2<sup>n</sup> secondes



# 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
  - Si le réacteur est 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 (une en cœur et l'autre au retraitement)
    - Pour un réacteur en combustible liquide, une seule charge suffit

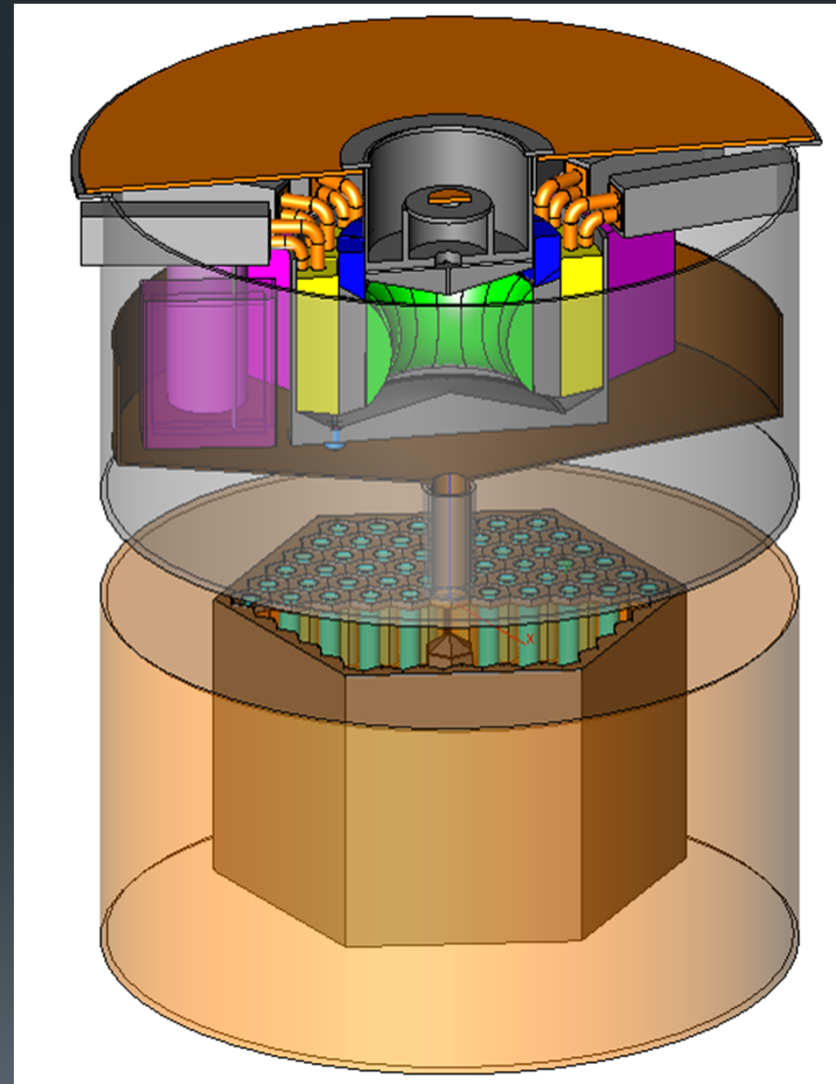


- Dans la nature on ne dispose que de  $^{235}\text{U}$  (0,72% de l' $^{\text{nat}}\text{U}$ )
  - A partir de cet  $^{235}\text{U}$ , on peut produire, du  $^{239}\text{Pu}$  ou de l' $^{233}\text{U}$  pour démarrer de nouvelles filières
    - Pour démarrer une filière Th-U on peut donc envisager 3 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...

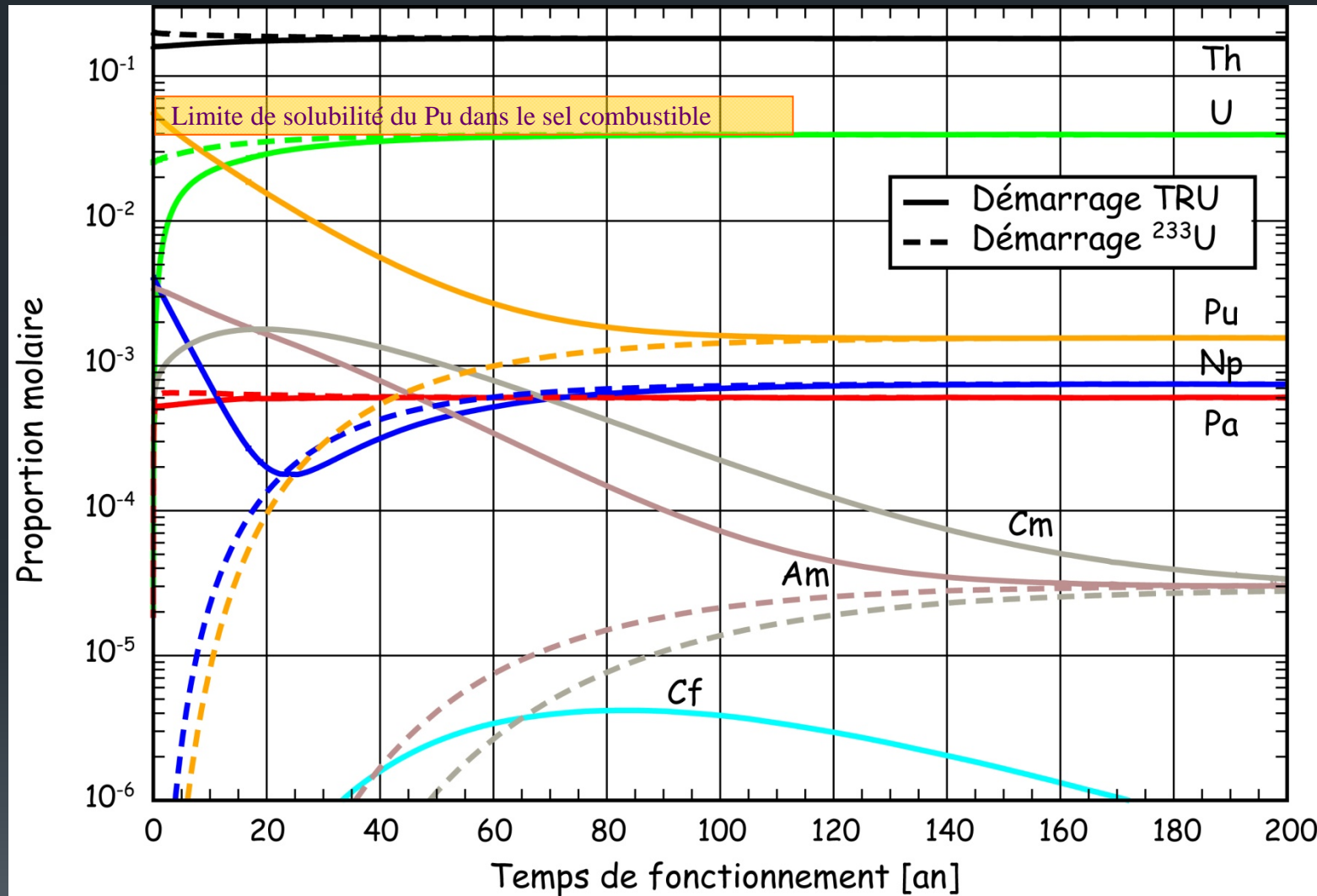


# Le MSFR démarré avec les TRU des REP actuels

- Sel initial : 77,5%  ${}^7\text{LiF}$ - 20%  $\text{ThF}_4$ ,-2,5%  ${}^{233}\text{UF}_4$
- Température de fonctionnement : 650 à 750 °C
- Température du sel combustible : 650 à 750 °C
- Puissance : 3  $\text{GW}_{\text{th}}$  (1,4  $\text{GW}_{\text{él}}$ )
  
- *Inventaire initial de Pu par réacteur : 11 200 kg*
- *Inventaire initial de Pu par  $\text{Gw}_{\text{él}}$  : 7 470 kg*
  
- Volume de sel combustible : 18  $\text{m}^3$ 
  - 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  $\text{m}^3$
- Sel de la couverture : 77,5%  ${}^7\text{LiF}$ ,-22,5%  $\text{ThF}_4$
- 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 $^{233}\text{U}$ )



34900 kg

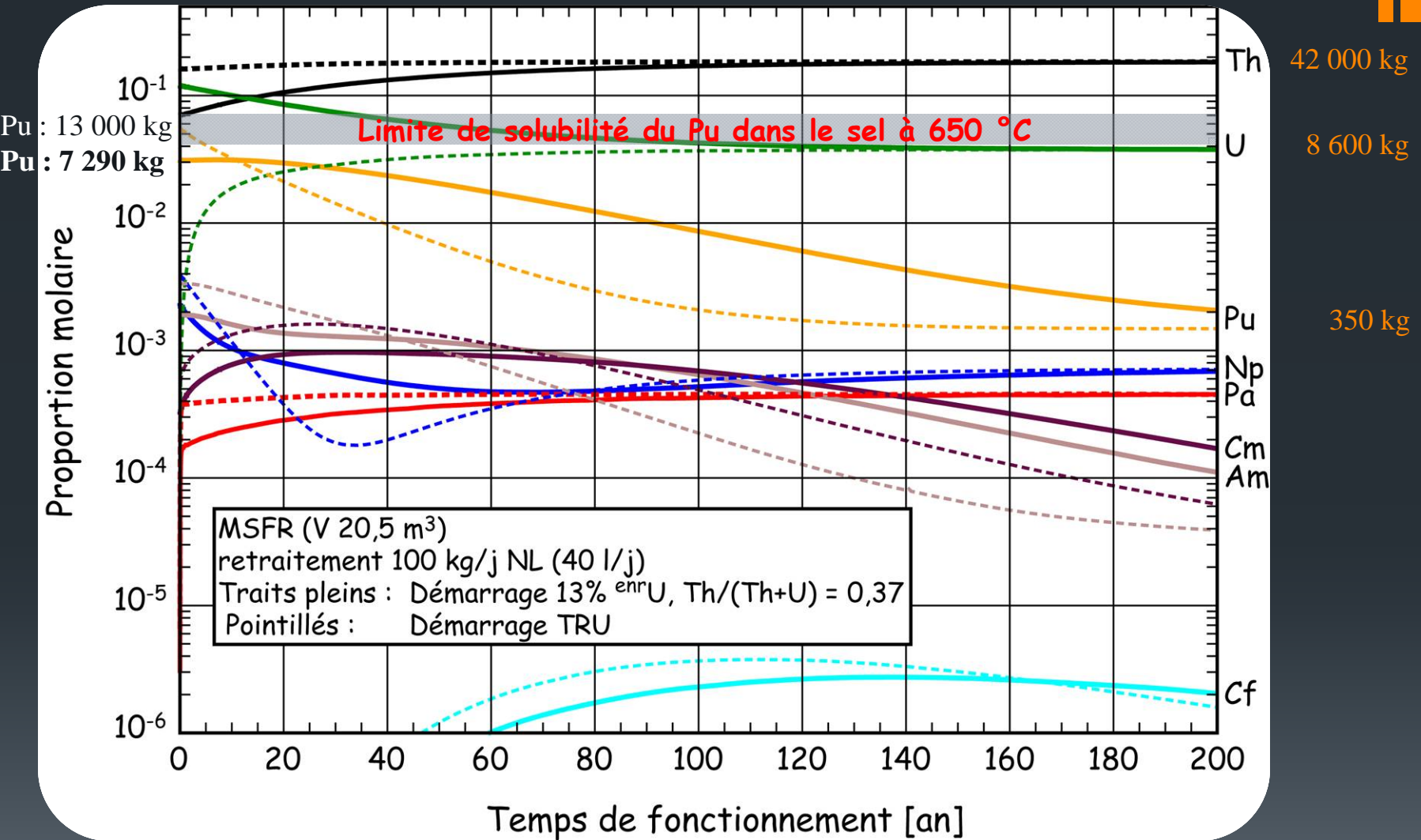
7580 kg

300 kg

6 kg



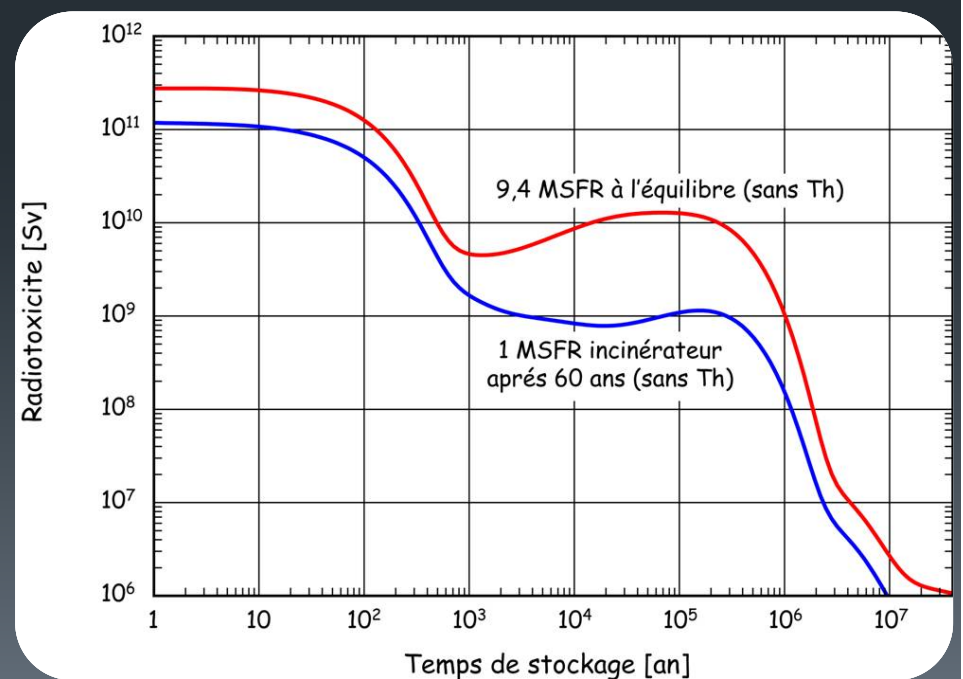
# Démarrage de la filière Th-<sup>233</sup>U avec de l'<sup>enr</sup>U et des TRU issus des REP



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

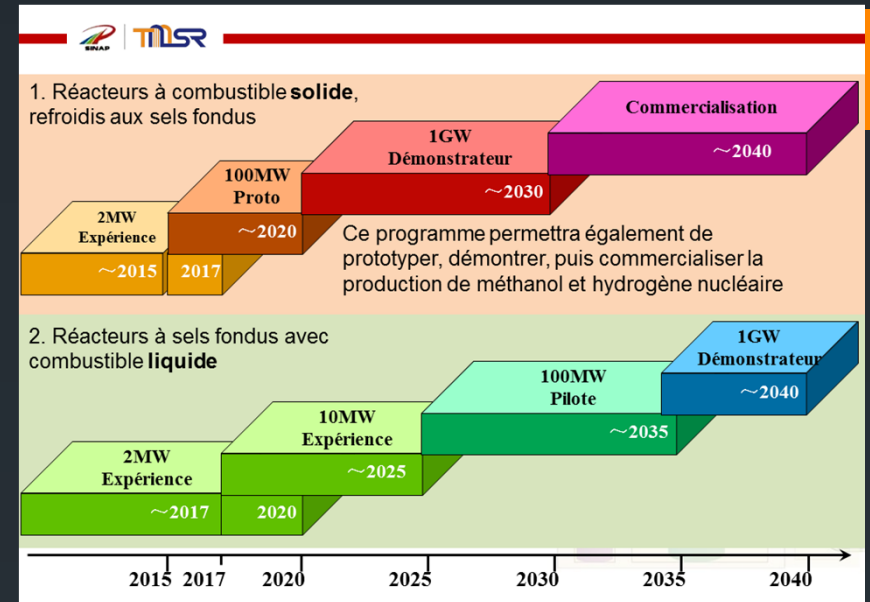
- Si, lors du retraitement du combustible, les rejets en actinides sont de 0,1% et que le volume du cœur est retraité en 5 ans, alors l'inventaire en actinides est supérieur aux rejets pendant au moins 5000 ans
  - Il est donc plus important de savoir réduire l'inventaire final lors de l'arrêt de la 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

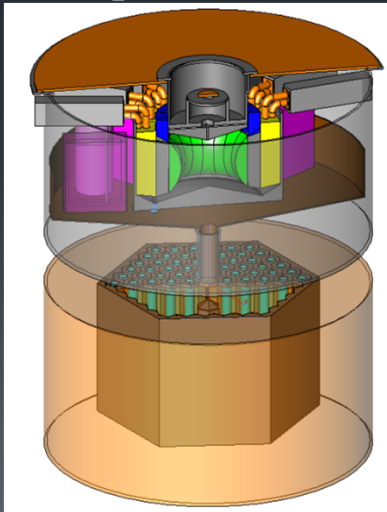


# Les réacteurs à sels fondus à l'international

- Les réacteurs à sels fondus donnent lieu à plusieurs projets récents dans le monde
  - Chine (TMSR)
  - Europe (MSFR)
  - Canada (IMSR)
  - Royaume-Uni (SSR)

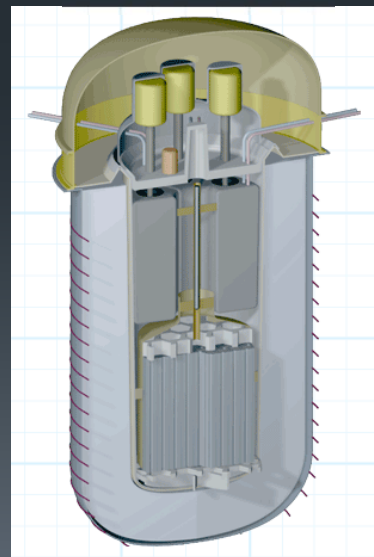


MSFR-SAMOFAR  
Europe 2015-2019



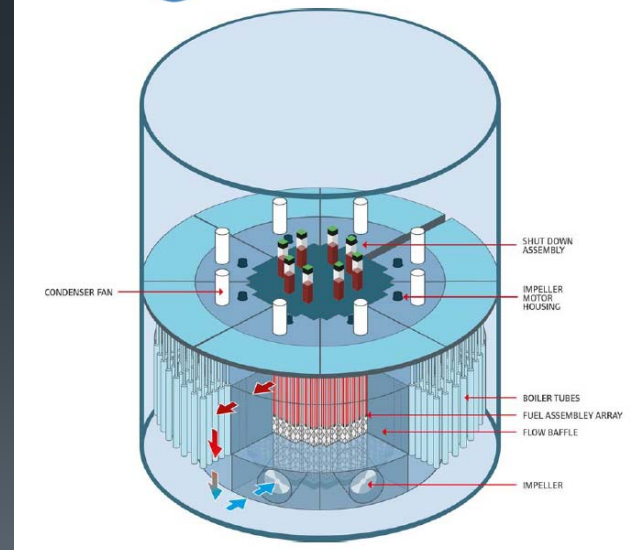
Molten Salt Fast Reactor

TERRESTRIAL  
ENERGY



Integral Molten Salt Reactor

moltex energy  
safer, cheaper, nuclear



Stable Salt Reactor

Merci pour votre  
attention

