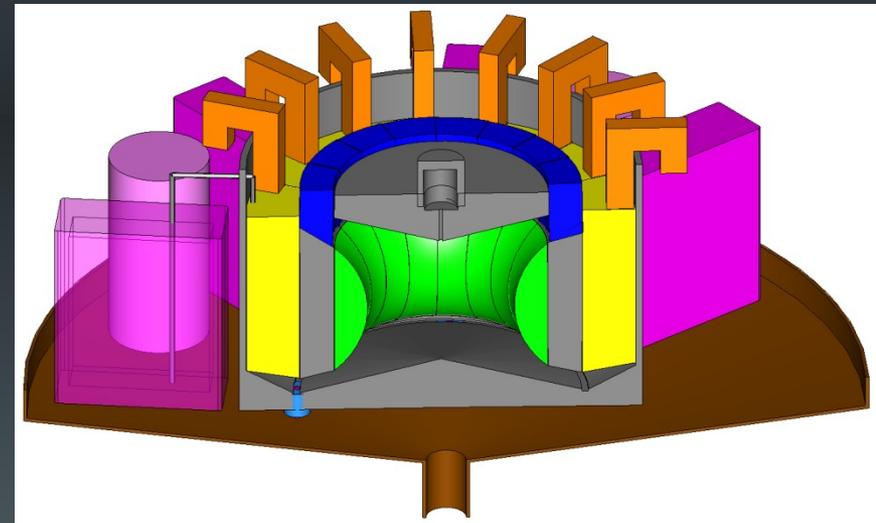




Réacteur nucléaire à combustible liquide le MSFR

vers un nucléaire "socialement acceptable"



Daniel Heuer

Directeur de recherche au CNRS

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie

Daniel.heuer@lpsc.in2p3.fr

Tentative de répartition de la production d'énergie primaire mondiale en 2050

- On suppose, en 2050
 - une demande de 20 Gtep (inclue une amélioration de l'efficacité énergétique de plus de 50%)
 - un retour à la production d'énergies fossiles de 2000 (qui ne suffit pas pour lutter contre le changement climatique)
 - Une équipartition entre nucléaire et renouvelables

Source [Gtep]	Production totale en		Scénario 20 Gtep en 2050	Commentaires
	Données IEA 2000	2014		
Fossile (gaz, pétrole, charbon)	8	11,2	8	Réduction des émissions de CO ₂ si capture et séquestration
Biomasse Traditionnelle	1,1	1,4	2	Essentiellement du bois
Hydraulique	0,22	0,35	0,5	Doublement par rapport à 2000
Nucléaire	0,68	0,66	4,75	Facteur 7
Nouveaux Renouvelables (solaire, éolien, biomasse)	0,01	0,08	4,75	Facteur 60 par rapport à 2014
Total	10,0	13,7	20	On est sur un chemin au-delà des 20 Gtep en 2050

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



Permettre de lutter efficacement contre le changement climatique



Être complémentaire avec les énergies renouvelables



Être très flexible et facilement pilotable



Pouvoir déployer rapidement des milliers de réacteurs dans le monde



Être très sobre en matières premières (uranium ou thorium)



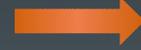
Les coûts doivent être raisonnables



Il doit être socialement acceptable et pérenne



En aucun cas des populations doivent être évacuées



Éliminer tous les risques de sur-accident



Les déchets doivent être gérables sur des temps humainement acceptables



Seuls les produits de fission peuvent être mis au déchet

Réacteurs nucléaire à combustible liquide

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

Quelles sont les contraintes sur le type de liquide ?

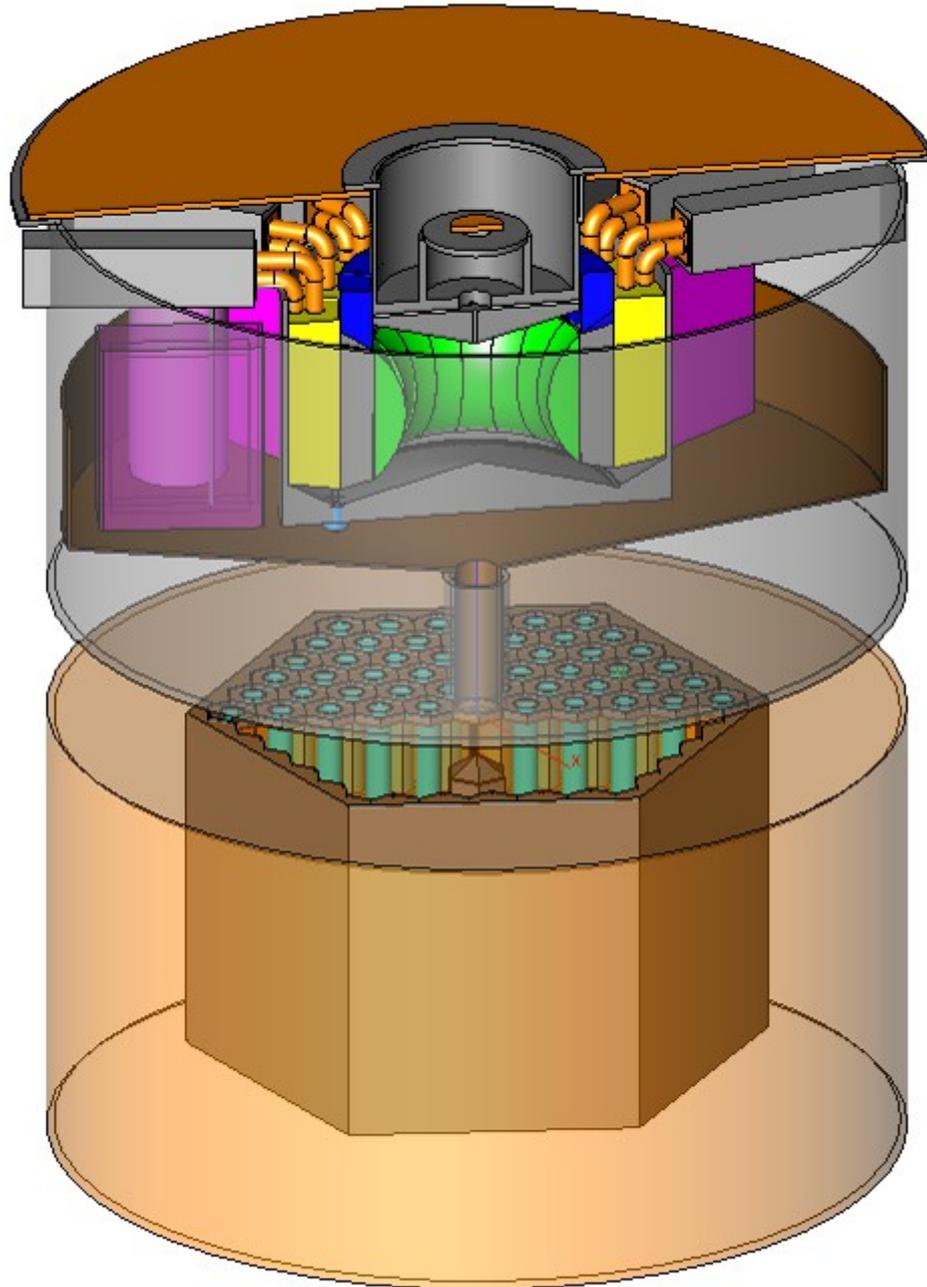
- Transparence aux neutrons
- Température de fusion pas trop élevée
- Température d'ébullition suffisamment élevée
- Tension de vapeur faible
- Bonnes propriétés thermiques et hydrauliques
- Stabilité du liquide sous irradiation
- Solubilité des éléments fissiles et fertiles suffisante
- Pas de production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

Les fluorures de lithium fondus sont les meilleurs candidats



Réacteurs à sels fondus

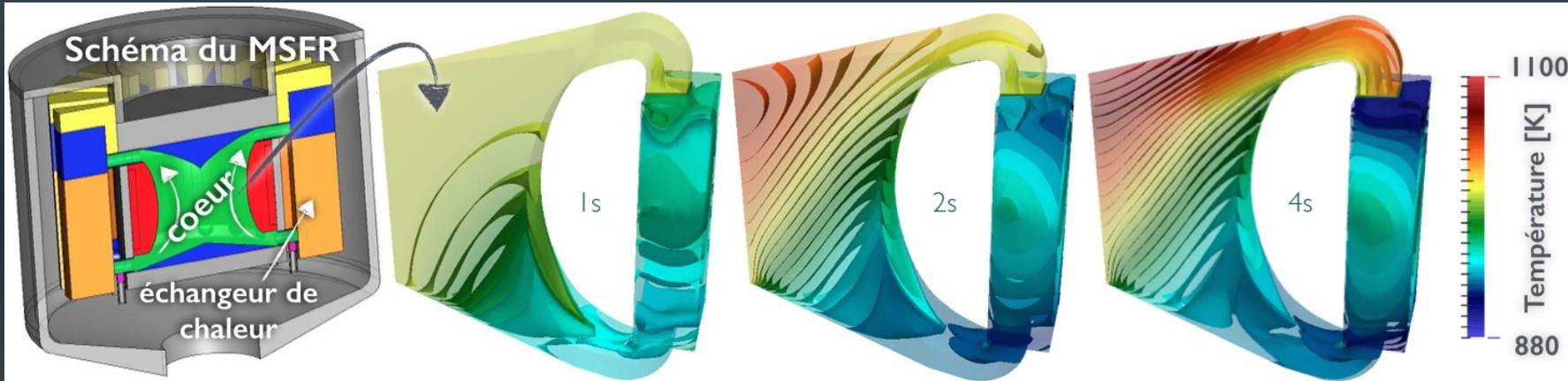
Le MSFR



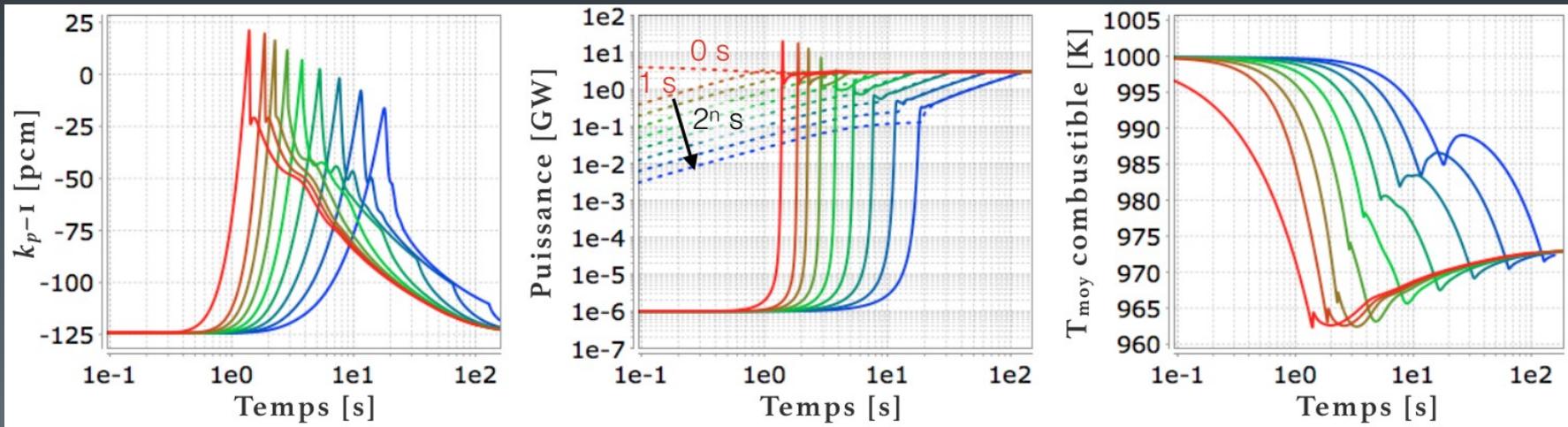
Accident de sur-refroidissement

- 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
 - C'est ce qu'il s'était produit à Tchernobyl
 - Avec un combustible liquide il n'y a pas de conséquences sur l'intégrité du réacteur
 - Cette particularité a déjà été utilisée avec des réacteurs expérimentaux pour produire des bursts de neutrons

Sur-refroidissement
instantané



Sur-refroidissement
en 2ⁿ secondes

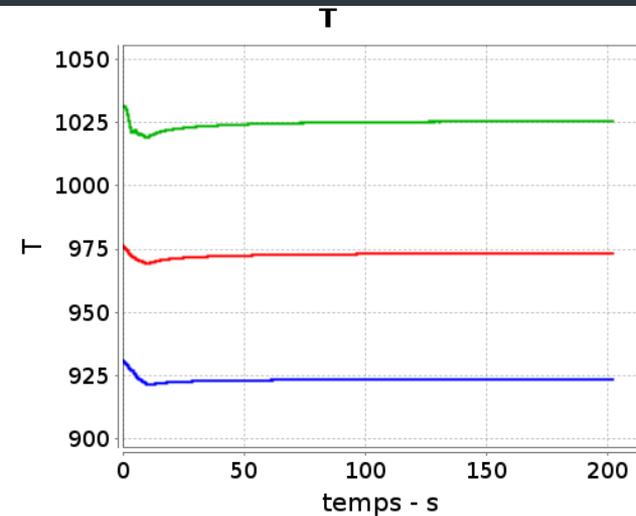
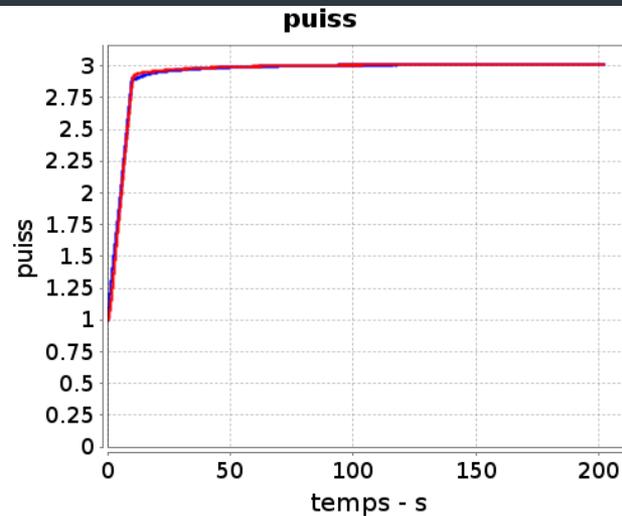
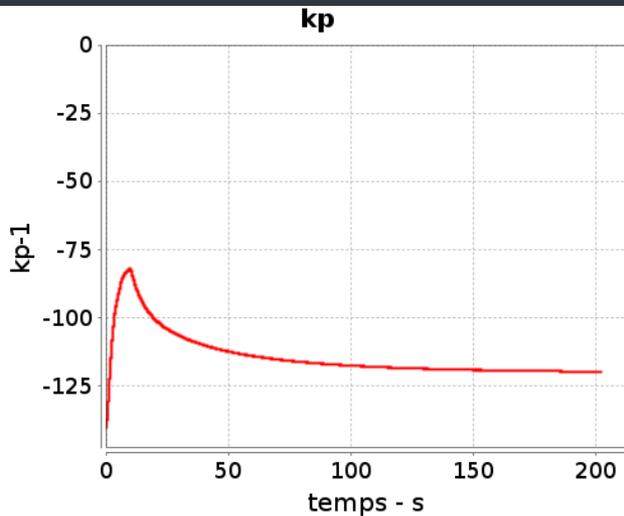


Suivi de charge rapide



- 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 !

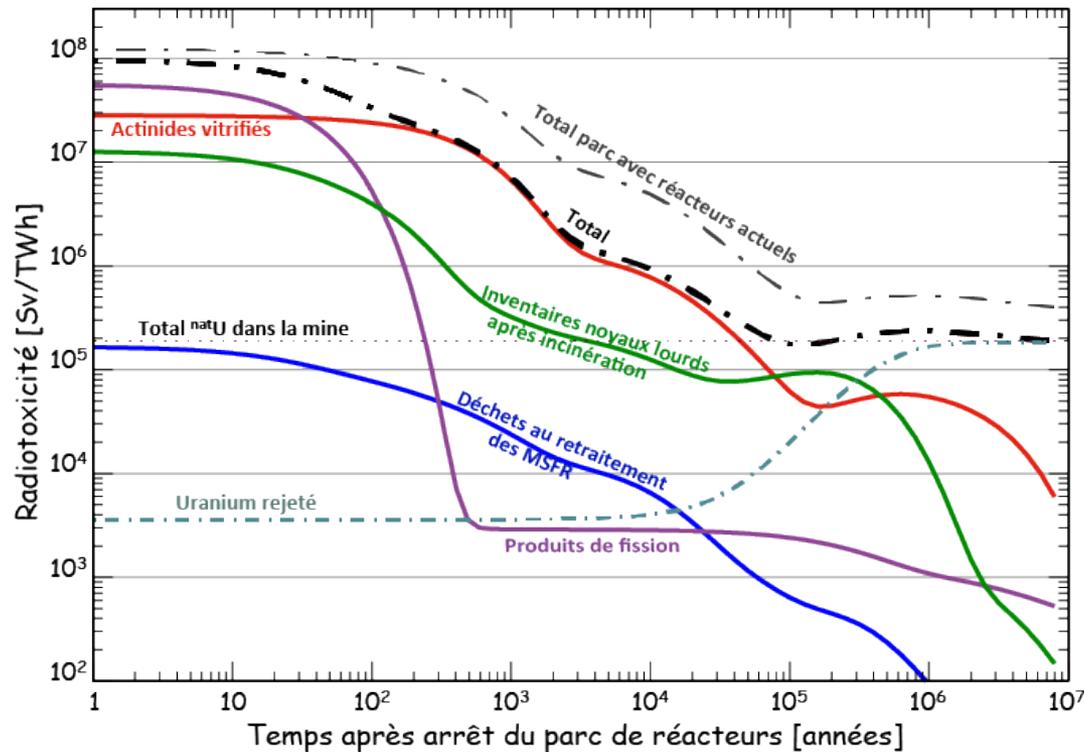
Il est clair que le circuit de conversion ne peut pas suivre un tel rythme
Les capacités de suivi de charge ne sont limitées que par le circuit de conversion



Capacité d'incinération

- Pas de fabrication du combustible
- Solubilité des actinides (Pu, Am, ...)
- Spectre neutronique rapide
- Coefficients de sûreté excellents et indépendants du combustible

- ✓ Incinération les actinides du parc actuel
- ✓ Pas de nouveaux actinides aux déchets



**Merci pour votre
attention**

**Nucléaire :
quels scénarios
pour le futur ?**

**Michel Chatelier
Patrick Criqui
Daniel Heuer
Sylvestre Huet**

360
collection dirigée par
Isabelle Joncour

la ville brûle