

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

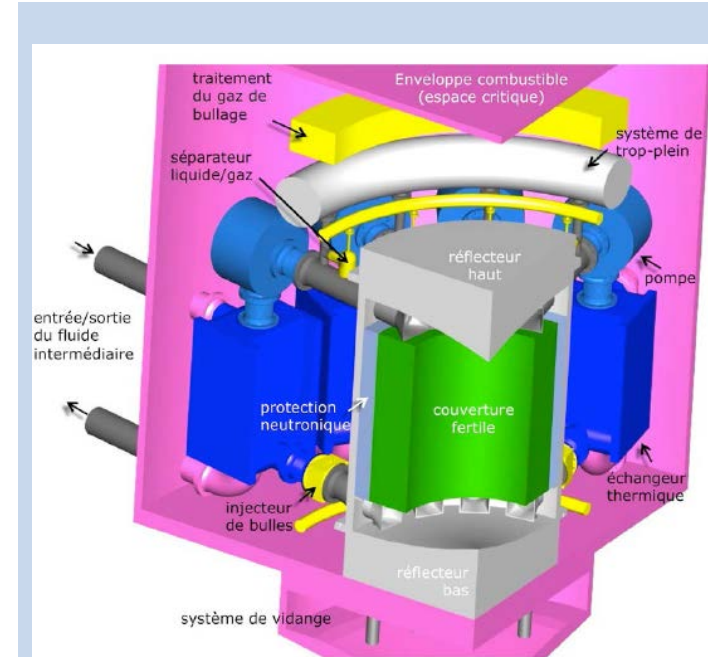
Examen du MSFR

V. TIBERI

NEEDS - *Systemes Nucléaires et scénarios*

Projet "Sûreté MSFR"

Grenoble - 24/25 Novembre 2014



Sommaire

1. Historique
2. Description du MSFR
3. Combustible et caloporteur
4. Risques inhérents à l'utilisation de sels
5. Thèmes de l'analyse transverse
 1. Maîtrise de la réactivité
 2. Sensibilité à la perte de refroidissement
 3. Confinement des matières dangereuses
 4. Sécurité en exploitation
 5. Inspection en service
 6. Séquences accidentelles et comportement en accident grave
 7. Impact dans l'environnement et radioprotection
 8. Maturité du concept et difficultés technologiques
 9. Points à approfondir dans le cadre de la démonstration de sûreté
6. Travaux en cours et perspectives

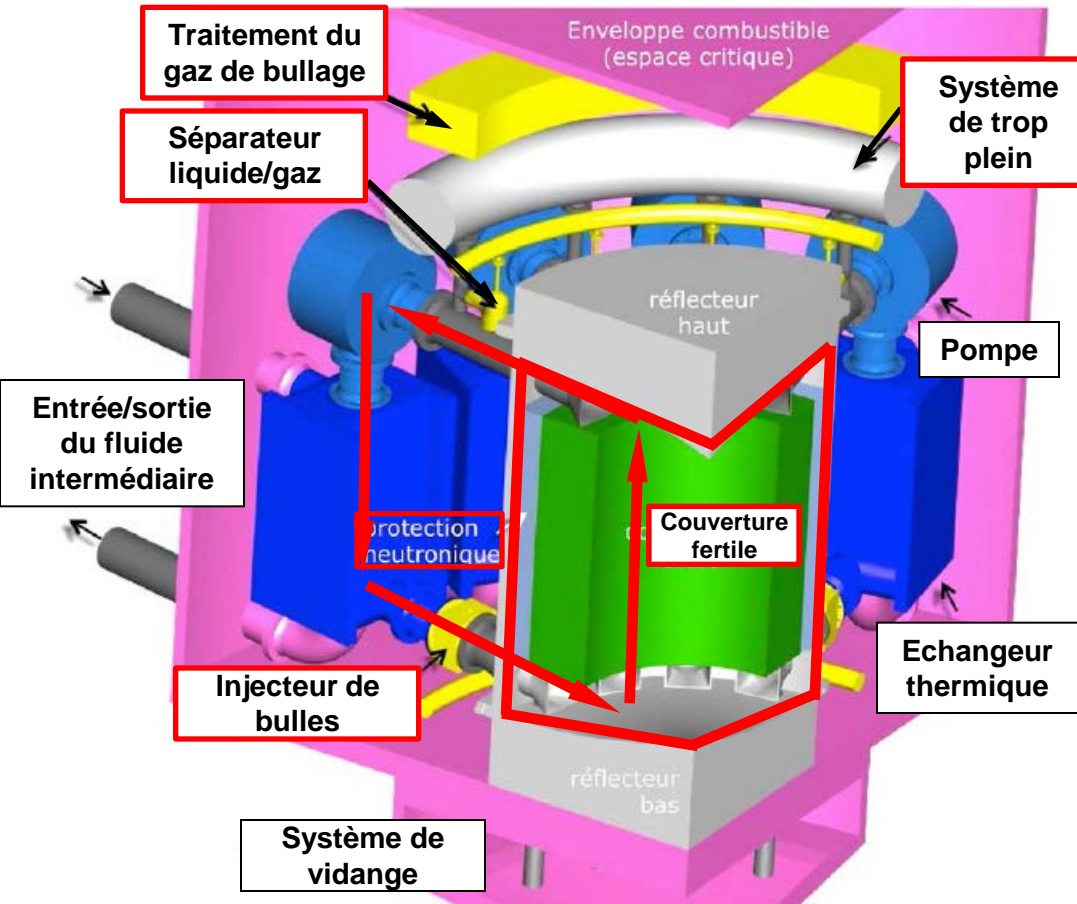
Historique

Deux réacteurs expérimentaux à sels fondus ont été construits et exploités aux USA :

- Projet ARE (« Aircraft Reactor Experiment », 1950) : prototype pour un moteur d'avion militaire
 - spectre thermique, modérateur béryllium
 - Une centaine d'heures de fonctionnement**
- Démonstrateur MSRE (« Molten Salt Reactor Experiment », 1962 Oak Ridge)
 - 8 MWth, spectre thermique, modérateur graphite
 - 13 000 heures de fonctionnement**

Description générale du MSFR

Schéma conceptuel



- Spectre rapide
- Puissance : 3000 MWth - 1300 MWe
- 18 m³ de sel, 9 m³ dans la cavité centrale
- Puissance volumique : 330 MW/m³
- $T_{in} = 700\text{ °C}$; $T_{out} = 770\text{ °C}$; $P < 0.5\text{ MPa}$
- Cycle complet du sel : 3-4 secondes
- 16 boucles de recirculation
- Circuit intermédiaire : sel inerte ($250\text{ °C} < T_{fus} < 450\text{ °C}$) ou plomb
- Circuit secondaire : eau supercritique

Combustible et caloporteur

Le sel combustible doit satisfaire de nombreux critères :

- ❑ température d'ébullition suffisamment élevée
- ❑ température de solidification pas trop élevée
- ❑ ne pas générer de radio-isotopes difficilement gérables
- ❑ coefficient de dilatation élevé
- ❑ bonne dissolution des éléments fissiles et fertiles
- ❑ stable au regard des effets d'irradiation
- ❑ caractéristiques favorables aux échanges thermiques
- ❑ compatible avec la tenue des matériaux de structures

MSFR : Fluorure de Lithium (LiF)

Choix de la matière fissile : ^{233}U pour les avantages du couple (^{233}U , ^{232}Th) en termes de surgénération. Ce choix permet aussi d'éviter les problématiques liées à la limite de solubilité du Pu dans le LiF (~ 6%)

Risques inhérents à l'utilisation de sels (1/2)

Corrosion des structures

- Phénomènes de corrosion de surface et inter-granulaire
- Travaux de R&D nécessaires (REX MSRE)

Interactions chimiques et thermodynamiques des sels avec l'eau

- Réactions chimiques
 - ❑ Formation de fluorure d'hydrogène, gaz toxique et corrosif
- Réactions thermodynamiques : risque d'explosion de vapeur
 - ❑ Les propriétés du sel et les températures en jeu sont susceptibles de conduire à un tel phénomène

Risques inhérents à l'utilisation de sels (2/2)

Risque de cristallisation des sels

- Le sel utilisé solidifie à une température élevée (585 °C). Les risques de cristallisation sont donc à étudier, notamment vis-à-vis :
 - ❑ des tubes des échangeurs : risque d'endommagement des structures à cause de la forte augmentation de température
 - ❑ de la fonction de vidange : bouchage potentiel du canal de transfert

Maîtrise de la réactivité

Coefficients de contre réaction :

- dilatation = -3.3 pcm/K
- Doppler = -1.7 pcm/K

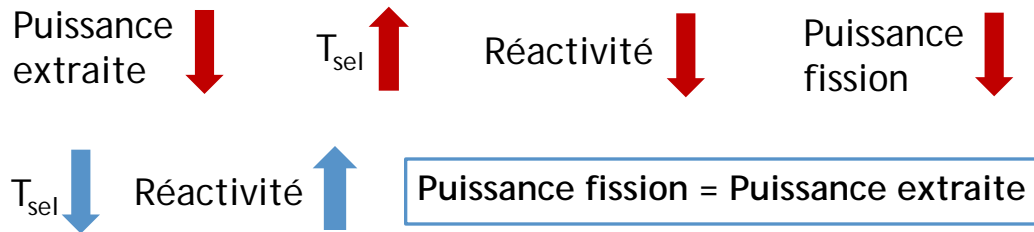
Cinétique rapide des contre réactions :

énergie de fission relâchée directement dans le caloporteur

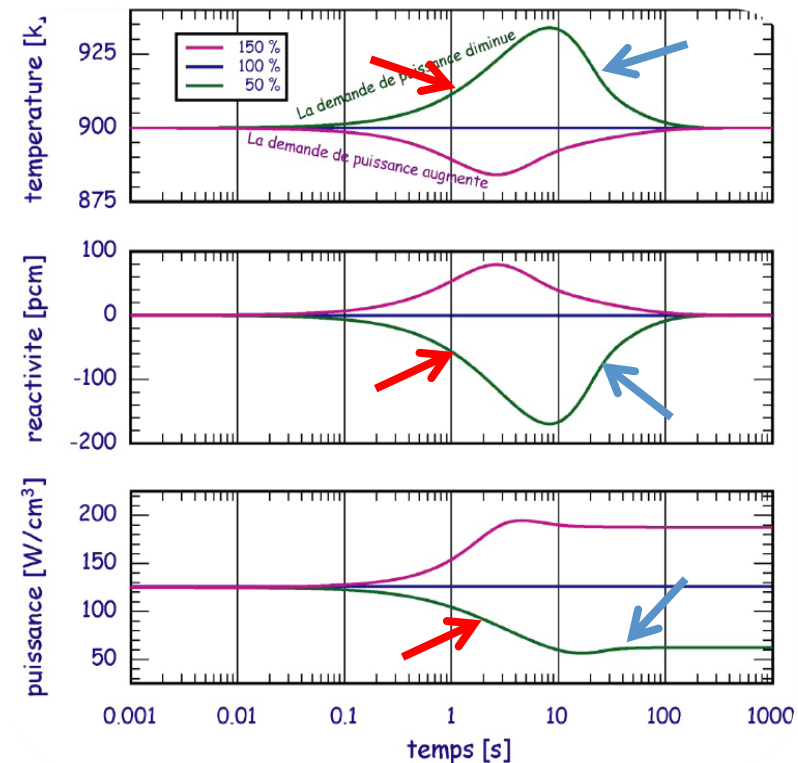
Vitesse du sel :

~ 4 secondes pour un cycle complet

Le réacteur se stabilise automatiquement et rapidement en fonction de la puissance appelée



Réacteur performant en termes de suivi du réseau



Maîtrise de la réactivité

Coefficients de contre réaction :

- dilatation = -3.3 pcm/K
- Doppler = -1.7 pcm/K

Cinétique rapide des contre réactions :

énergie de fission relâchée directement dans le caloporteur

Vitesse du sel :

~ 4 secondes pour un **cycle complet**

Le réacteur se stabilise automatiquement et rapidement en fonction de la puissance appelée

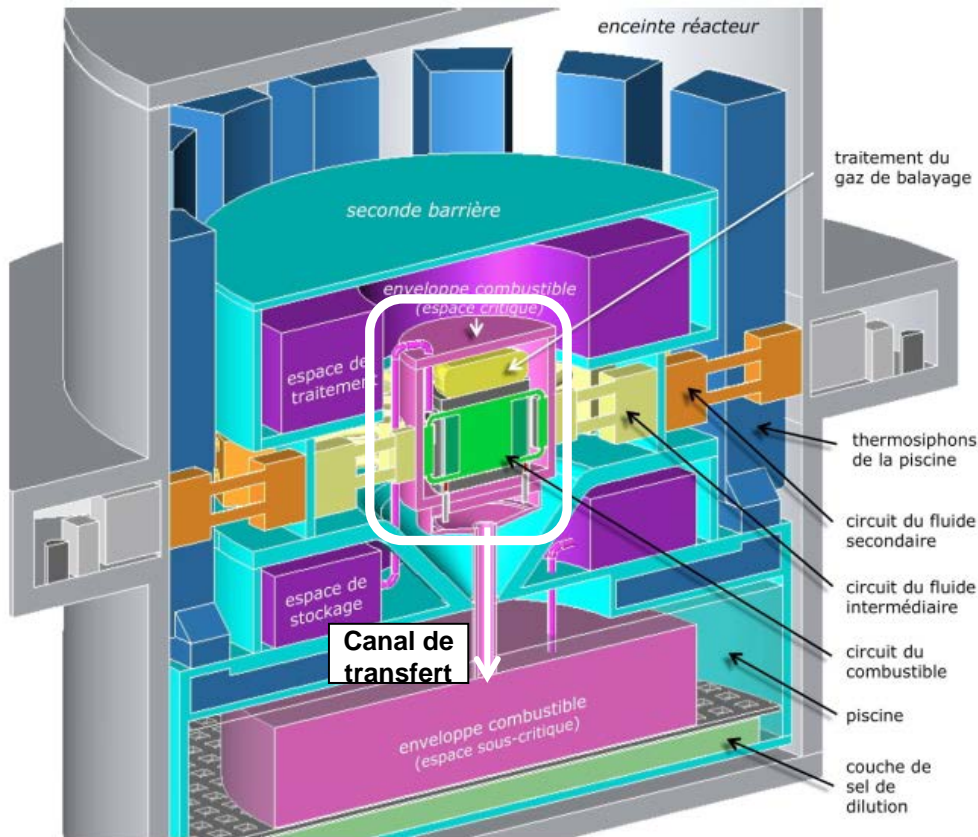
Si la puissance appelée est inférieure à la puissance produite par la décroissance des produits de fission, le cœur devient automatiquement et rapidement sous-critique

Dans le MSFR il n'y a pas des barres absorbantes

- Approche sous-critique difficile notamment lors du premier démarrage
 - Forte sous-criticité après le remplissage à cause des incertitudes importantes

- *Le MSFR semble être très stable du point de vue neutronique , même en cas d'insertion importante de réactivité*
- *Le problème de re-criticité dans l'espace sous-critique semble avoir été exclu*
- *La prédiction des paramètres neutroniques semble être extrêmement complexe à cause des incertitudes*

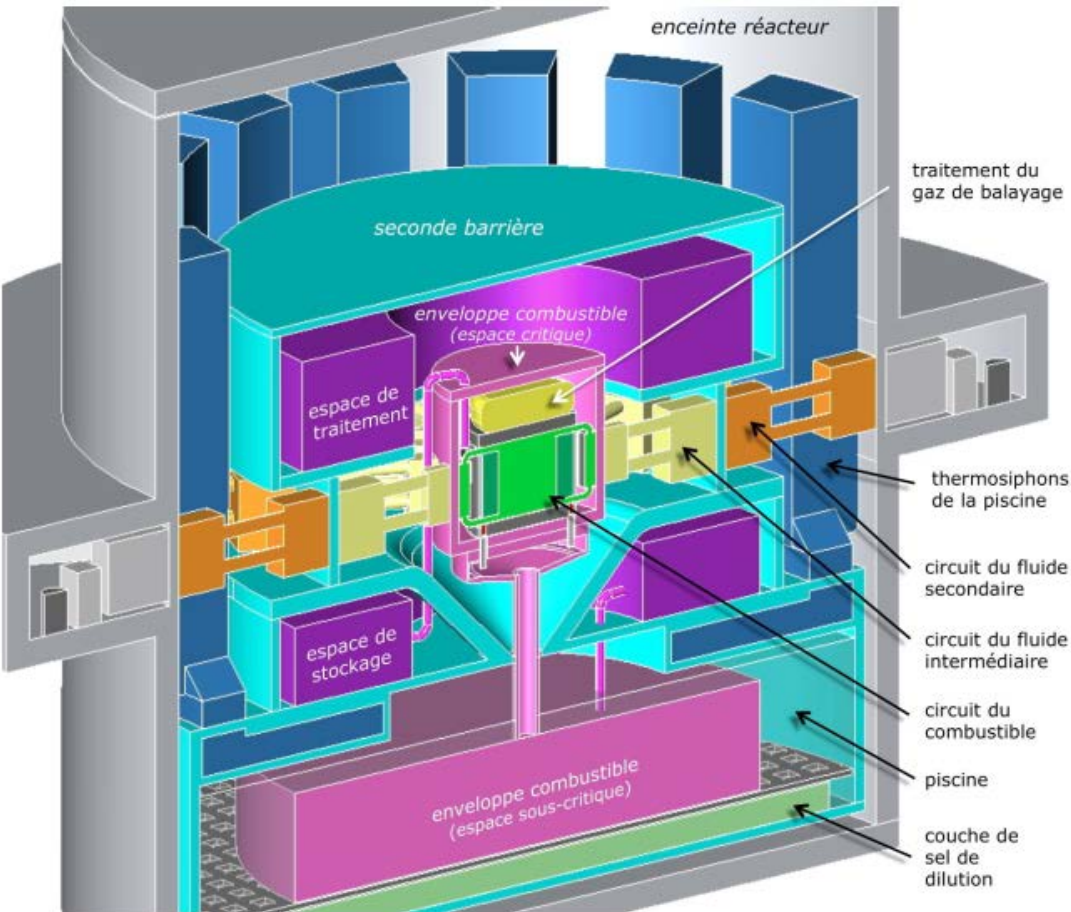
Sensibilité à la perte de refroidissement



- En cas de perte des moyens normaux de refroidissement, le sel est vidangé dans l'espace sous-critique
- **Délai de vidange : entre 10 et 20 minutes**
- L'évacuation de la puissance résiduelle est assurée par une piscine contenant une grande quantité d'eau à la température ambiante dans laquelle est immergé l'espace sous-critique

- **Le MSFR possède une bonne inertie thermique, à condition que le sel soit vidangé dans l'espace sous-critique**
- **A l'état actuel des connaissances, la convection naturelle dans l'espace critique ne permet pas d'évacuer complètement la puissance résiduelle, mais limite la vitesse d'échauffement du sel et accroît donc le délai disponible pour la vidange**

Confinement des matières dangereuses



- La stratégie de confinement :
 - ❑ des circuits véhiculant du sel étendus et complexes
 - ❑ un inventaire radioactif évolutif en quantité, localisation et composition
 - ❑ l'existence de nombreux circuits auxiliaires
 - ❑ l'unité de traitement et les produits issus des procédés mis en œuvre

Sûreté en exploitation

- **Suivi en temps réel de l'état de l'installation** : le couplage entre différents phénomènes (neutroniques, thermohydrauliques, mécaniques...) rend plus difficile l'identification de l'origine de phénomènes anormaux
- **Contraintes d'exploitation** :
 - fréquences de contrôles des structures et des composants ou de remplacement plus élevées du fait de la nature corrosive du caloporteur
 - la gamme de fonctionnement en température est relativement restreinte (560 °C - 700 °C)
- **Pilotage de l'installation** : pilotage théoriquement aisé, le réacteur se stabilisant automatiquement au niveau de puissance appelée. Le démarrage des premiers cœurs pourrait cependant s'avérer complexe et présenter des risques. Nécessité de définir une procédure
- **Architecture des systèmes de sûreté** : simplifiée (vidange automatique du sel, pas de barres absorbantes)

Inspection en service

- La vidange du sel combustible dans les états d'arrêt doit permettre d'inspecter le circuit combustible. L'espace sous-critique peut être inspecté lorsque le sel est entreposé dans l'espace de stockage

Les moyens d'introduction des dispositifs de contrôle restent toutefois à définir

- Les techniques de mesures devront tenir compte des films ou résidus de sel qui pourraient subsister à la surface des équipements après vidange

- *Le concept du MSFR n'est pas suffisamment défini pour se positionner sur la possibilité d'inspection en service*
- *Cependant, l'inspection en service des structures et composants du MSFR semble être complexe et pourrait constituer un point dur de ce concept*

Séquences accidentelles

Anomalies de réactivité

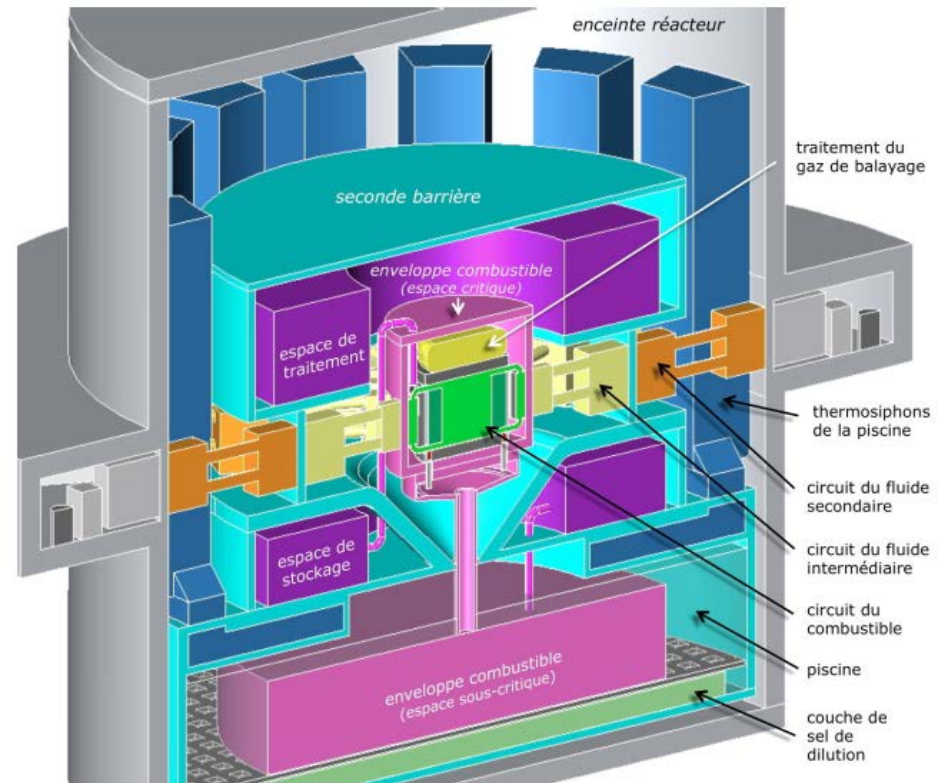
- Atteinte de la prompte criticité : 1000
- Aucun scénario conduisant à une insertion

Impossibilité de vidanger le sel en cas

- Si le sel n'est pas vidangé dans un délai
- Un point faible qui cèdera avant tout au l'espace critique

Accident grave

- La perte de l'intégrité de l'enveloppe combustible pourrait correspondre à la définition d'un accident grave : l'interaction thermodynamique entre le sel et l'eau pourrait menacer l'intégrité de la deuxième, voire de la troisième barrière
- Risque de re-criticité du sel dans l'eau a priori écarté : des stocks de sels inertes comportant des poisons neutroniques sont envisagés dans le fond de la piscine de refroidissement



Impact dans l'environnement et radioprotection

Composition du fluide primaire

- Inventaire radiologique : ensemble des éléments radiologiques et chimiques contenus dans l'enveloppe combustible, le sel combustible circulant à la fois dans le réacteur et dans l'unité de retraitement si elle est associée au réacteur

Radioprotection

- Le combustible et le caloporteur étant confondus, il n'y a pas de fluide primaire pouvant jouer le rôle d'écran
- Exposition pendant les activités de maintenance assez importante à cause des traces de sel dans le circuit primaire après vidange
- L'exposition globale des travailleurs dépendra du niveau d'automatisation des opérations de maintenance

Maturité du concept et difficultés technologiques

- Le MSR ne dispose que d'un retour d'expérience très limité (deux réacteurs expérimentaux, en spectre thermique et utilisant de l'uranium comme combustible)
- Le projet MSRE a cependant permis de tirer des enseignements intéressants sur la maîtrise du phénomène de corrosion des matériaux de structures et le comportement du réacteur en transitoire
- Le choix et la validation d'un matériau capable de fonctionner pour une durée de vie importante à haute température, en milieu salin et en présence de PF, ainsi que la conception des échangeurs intermédiaires sont des éléments-clés pour démontrer la viabilité du concept

- ***Le développement de ce type de réacteur doit passer par un plan détaillé de développement comportant des études et des essais pour valider différentes options technologiques et leur faisabilité***
- ***L'IRSN considère que le développement de cette filière devra passer par un démonstrateur de petite puissance dont la réalisation n'est envisageable qu'à moyen terme***

Points à approfondir dans le cadre de la démonstration de sûreté

- ❖ Maîtrise du risque de corrosion des structures
- ❖ Maîtrise de la réactivité - couplage spatio-temporel entre d'une part la neutronique et d'autre part, la thermohydraulique, la physicochimie et la mécanique
- ❖ Approche de la criticité au premier chargement et en phase de démarrage
- ❖ Maîtrise de la distribution de la matière fissile et de la puissance dans le sel combustible
- ❖ Fiabilité et performances du système de vidange du sel combustible
- ❖ Faisabilité de l'inspection en service
- ❖ Maîtrise du risque de cristallisation du sel
- ❖ Définition de l'accident grave - risque de phénomènes énergétiques (réaction thermodynamique et réaction chimique entre le sel et l'eau)
- ❖ Gestion des rejets des produits toxiques tels que l'acide fluorhydrique (HF) et les sels chargés en radioéléments extraits du réacteur
- ❖ Limitation de l'exposition des travailleurs pendant les opérations de maintenance

Travaux en cours et perspectives

Projets en cours

- Russie - MOSART (2240 MWth), destiné à l'incinération des transuraniens
- Chine - projet TMSR : réacteur de recherche à spectre thermique et démonstrateur
- JAPON - projet FUJI (100 MWe)
- USA - réacteurs à haute température à sels fondus et combustible solide

R&D

- Europe → MOST : identification des points-clés de R&D
 - ALICIA (2007) : renforcer le réseau européen d'expertise
 - EVOL (2011) : évaluation des réacteurs rapides à combustible liquide
 - SAMOFAR (2014) :
 - preuves expérimentales
 - démonstration de sûreté (réacteur et unité de retraitement)
 - mise à jour de la conception
 - roadmap

Conclusions

Atouts du MSR

- Bonnes caractéristiques neutroniques → comportement très stable
- Possibilité de retraiter le combustible sans arrêter le réacteur
- Burn-up a priori homogène du combustible → absence de points chauds

Points à approfondir

- Maîtrise du risque de corrosion des structures
- Fiabilité et performances du système de vidange
- Maîtrise du risque de cristallisation du sel
- Phénomènes énergétiques : réaction sel/eau
- Gestion des produits toxiques
- Approche de la criticité au démarrage

Points clés pour la conception

- Matériaux résistant à haute température, en milieu salin et en présence de PF pour une durée de vie importante
- Instrumentation
- Echangeurs intermédiaires

⇒ Il est prématuré de se prononcer sur le niveau de sûreté des MSR