



# Les réacteurs à sel fondu Bilan et perspectives en 2021



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Mars 2021

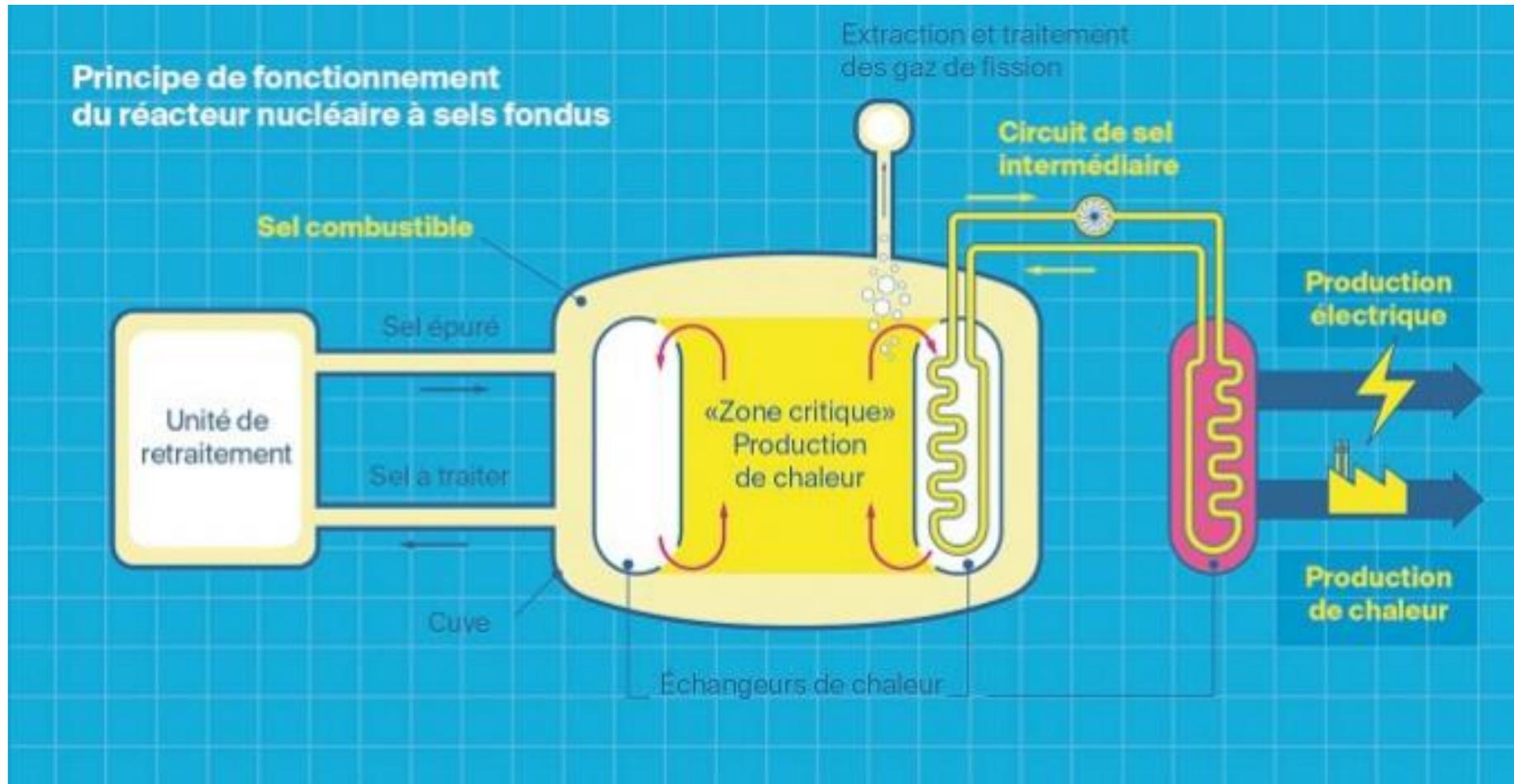
Joel Guidez

- **Qu'est-ce qu'un réacteur à sels fondus ?**
- **Panorama international**
- **Intérêts et verrous de cette filière**
- **Les MSR en France**
- **Perspectives**

Criticité obtenue par :

**La composition du sel** (quantité de matière fissile) + **Les conditions géométriques**

→ Fissions négligeables en dehors de la zone cœur



- Le concept MSR date des années 50
- Développé aux USA pour les besoins militaires
- propulsion d'un bombardier militaire à très long rayon d'action
- Intérêts : temps de vol, densité, variations de puissance rapide

- Un prototype : l'ARE (Aircraft Reactor Experiment)

Développé... et construit !

En fonctionnement du 3 au 12 Novembre 1954 ... = 9 jours

Problèmes de corrosion sur les matériaux utilisés (Acier Inconel)

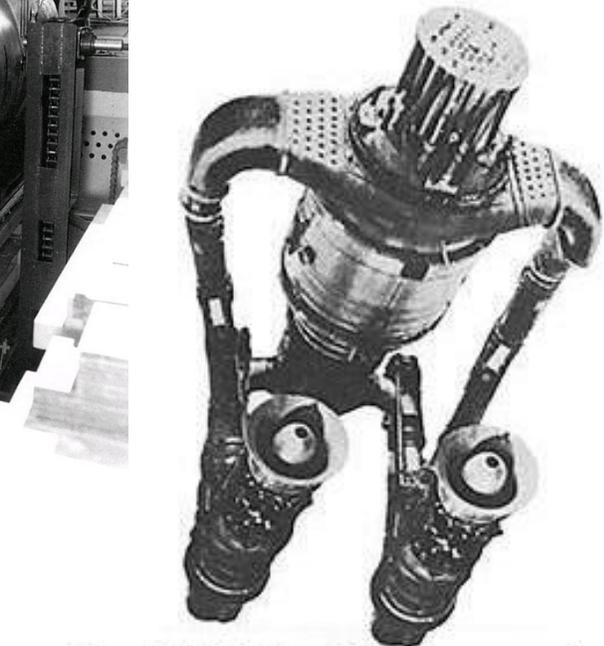
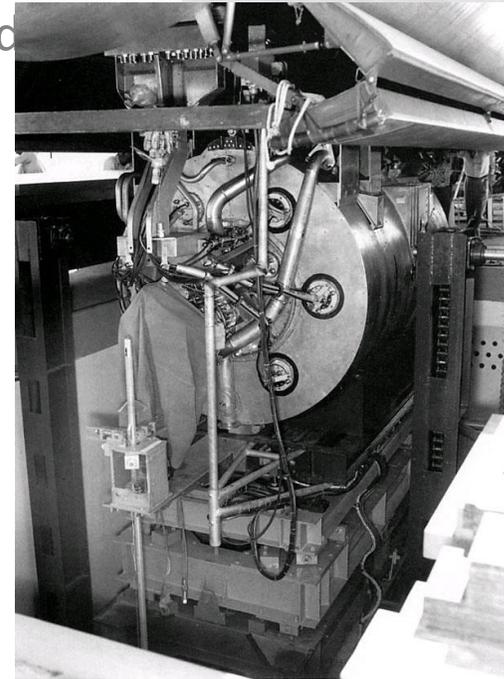
→ **Trop gros problèmes de radioprotection**

(besoin de trop de plomb pour protéger les pilotes)

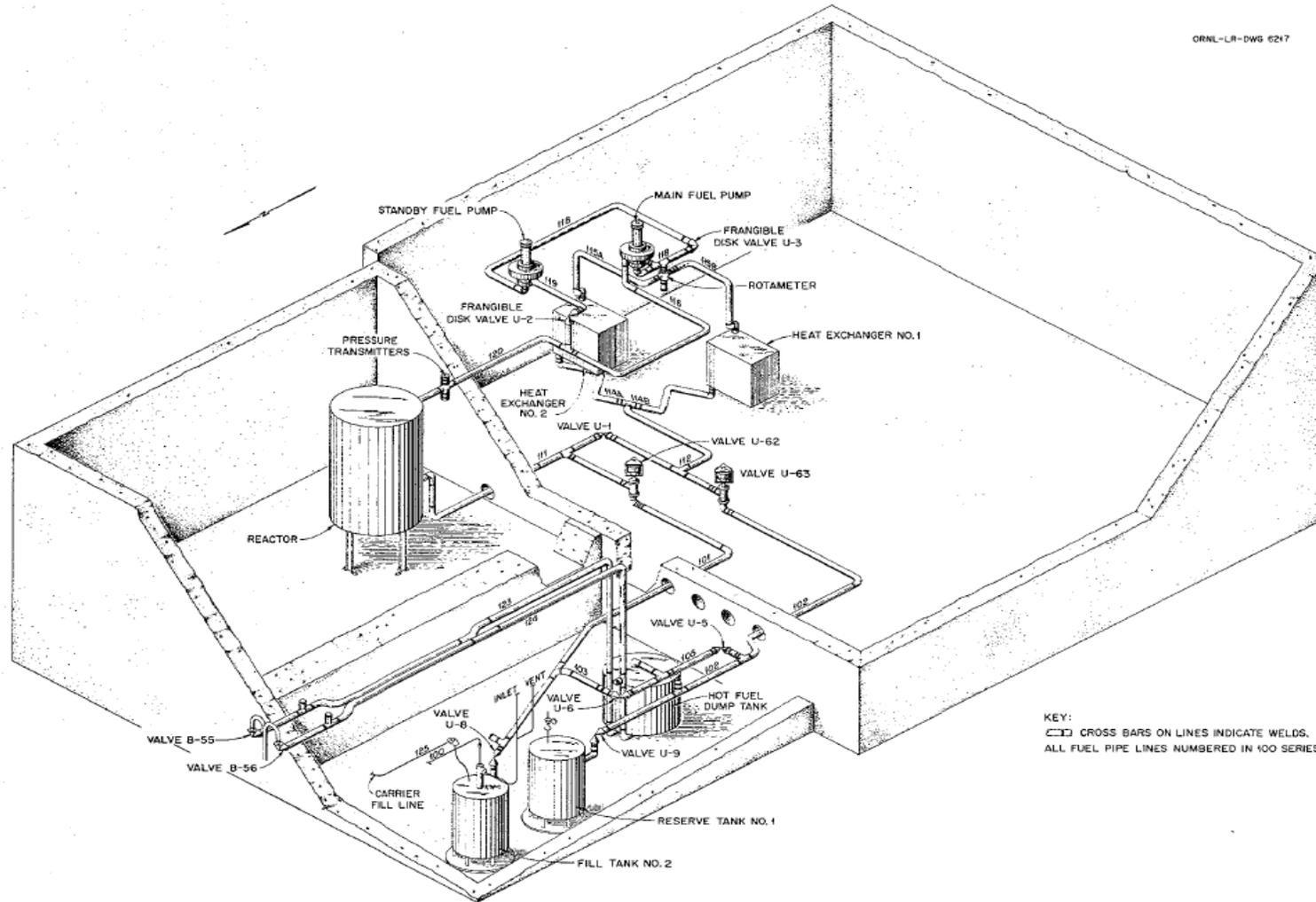
→ Arrêt à ce stade de la carrière militaire des MSR

Intelligence des chercheurs de l'ORNL → Prise de conscience des potentialités des MSR pour la société civile

→ Poursuite des recherches ... → le MSRE



The HTRE-3 without supporting structure.



Réacteur expérimental de plus forte puissance (7,4 MW)

En fonctionnement de 1965 à 1970 à Oak Ridge National Laboratory

→ Changement de matériau / ARE : Hastelloy N

- Puis sur la base du REX du MSRE :

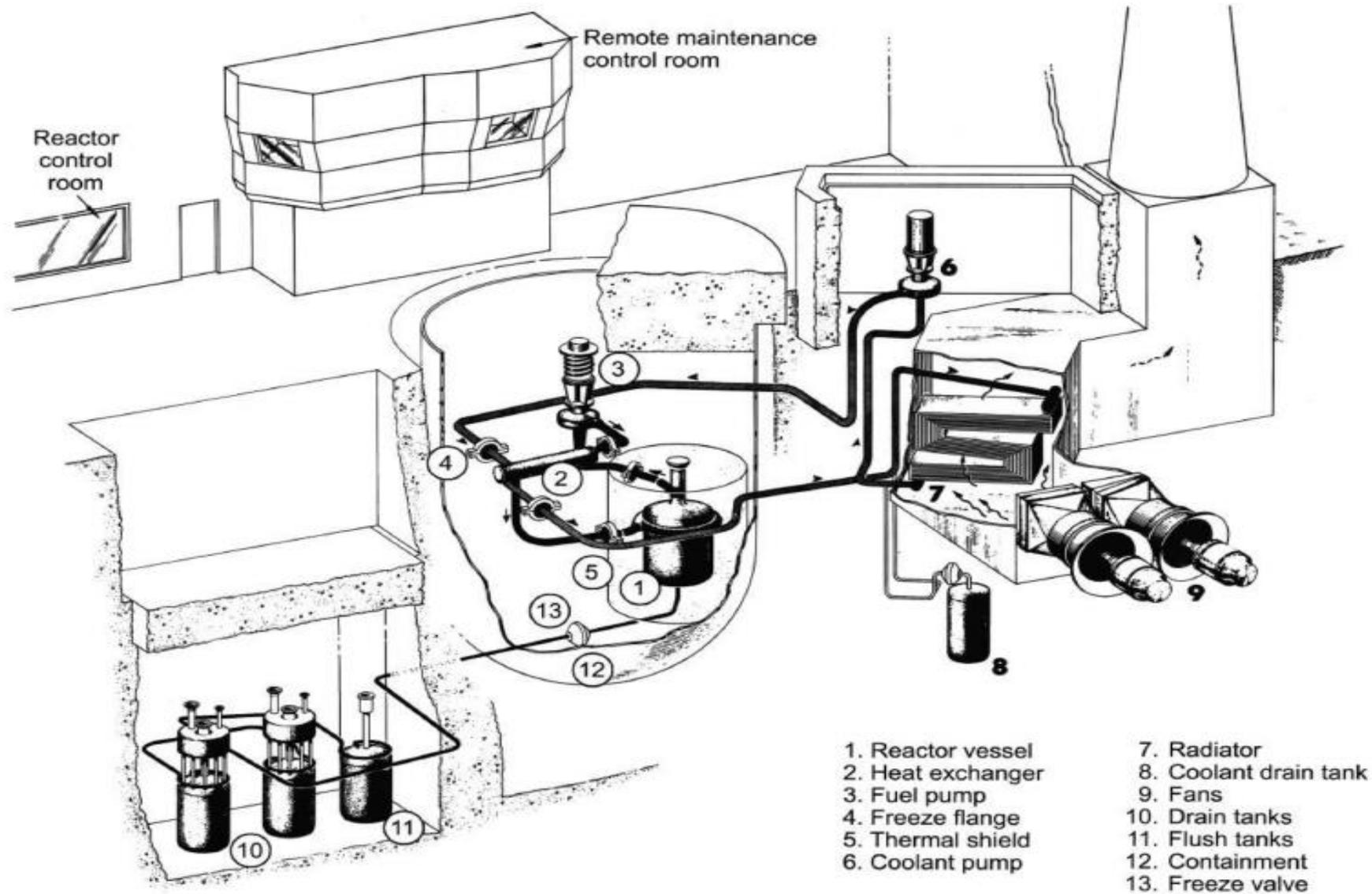
Projet de réacteur électrogène de plus forte puissance à l'ORNL

→ le MSBR (Molten Salt Breeder Reactor)

Key Features	ARE	MSRE	MSBR (Design)
<i>Name and Dates</i>	Aircraft Reactor Experiment 1954	Molten Salt Reactor Experiment 1965-1970	Molten Salt Breeder Reactor (design) 1970-1976
<i>Peak Power Output (MWt)</i>	~2.5*	~8*	n/a
<i>Peak Temperature (°C)</i>	860	650	705
<i>Solid Moderator</i>	BeO	Graphite	Graphite
<i>Fuel-Salt Composition (% mol)</i>	NaF-ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> (53-41-6)	<sup>7</sup> LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> (65-30-5-0.1)	<sup>7</sup> LiF-BeF <sub>2</sub> -ThF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> (72-16-12-0.4)
<i>Secondary Coolant</i>	Na metal	<sup>7</sup> LiF-BeF <sub>2</sub>	NaF-NaBF <sub>4</sub>

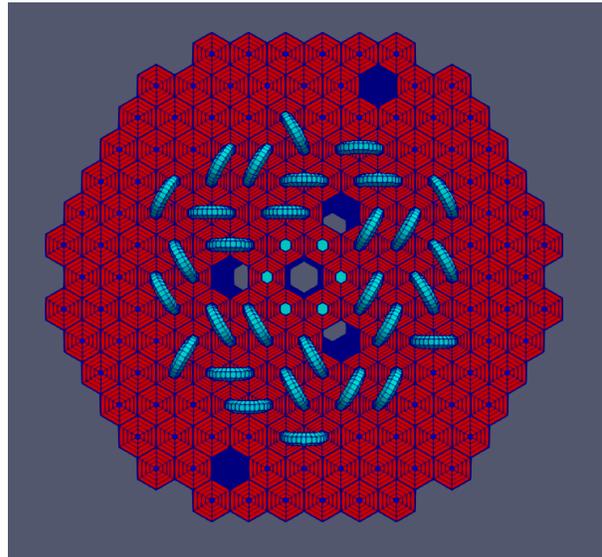
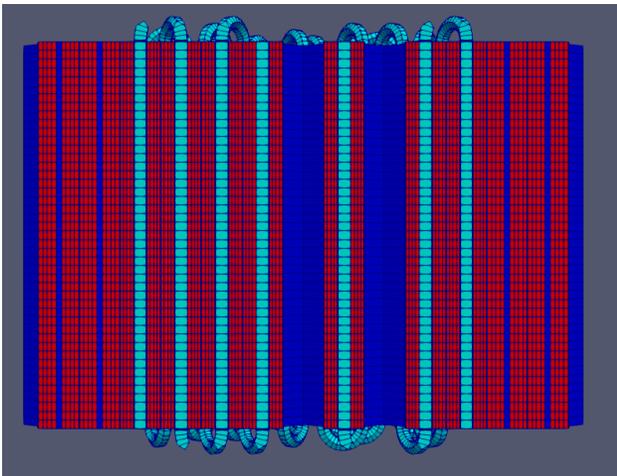
<sup>235</sup>U, then <sup>233</sup>U then <sup>239</sup>Pu  
(no thorium inside)

► Le REX des MSR dans le monde se limite à celui du MSRE. Aucun autre MSR n'a été construit, en particulier aucun MSR à spectre rapide



- Fonctionnement durant 15 mois, dont 6 en continu sans vidange du sel
- Deux campagnes : une avec U 234 enrichi/ Une avec U 233/ Sels fluorures/ Pas de thorium
- Temps total de circulation du combustible : 21 788 h
- Sur cette durée relativement courte : bon déroulement du fonctionnement
- Une petite série de problèmes usuels d'exploitation à résoudre (rupture du ventilateur, entrainement de gaz, défaut de chute de barres, fissuration d'une vanne lors d'une vidange, etc. )
- Le Xénon (poison neutronique principal) récupéré sous forme gazeuse en continu
- Pas de nécessité de retraiter le sel pour pouvoir fonctionner  
Seul l'uranium 233 a été extrait et récupéré lors d'une campagne effectuée ultérieurement.
- **Pas de retraitement du sel** : toujours stocké avec ses PF sur le site

- ▶ Le REX MSRE et ARE sont extrêmement bien documentés et disponibles
- ▶ Des avancées nettes sur les matériaux (hastelloy) qualifiés jusqu'à 700°C et sur les modes opératoires
- ▶ Des calculs sont en cours au CEA pour valider des codes sur ces bases expérimentales ( ci-dessous des calculs TRIO sur l' expérience ARE



**Le choix du sel dépend de l'application : cycle U/Pu vs cycle U/Th, rapide vs thermique...**

▶ **Sels fluorures souvent retenus en spectre thermique ou en cycle U/Th**

→ Utilisation du REX sur MSRE

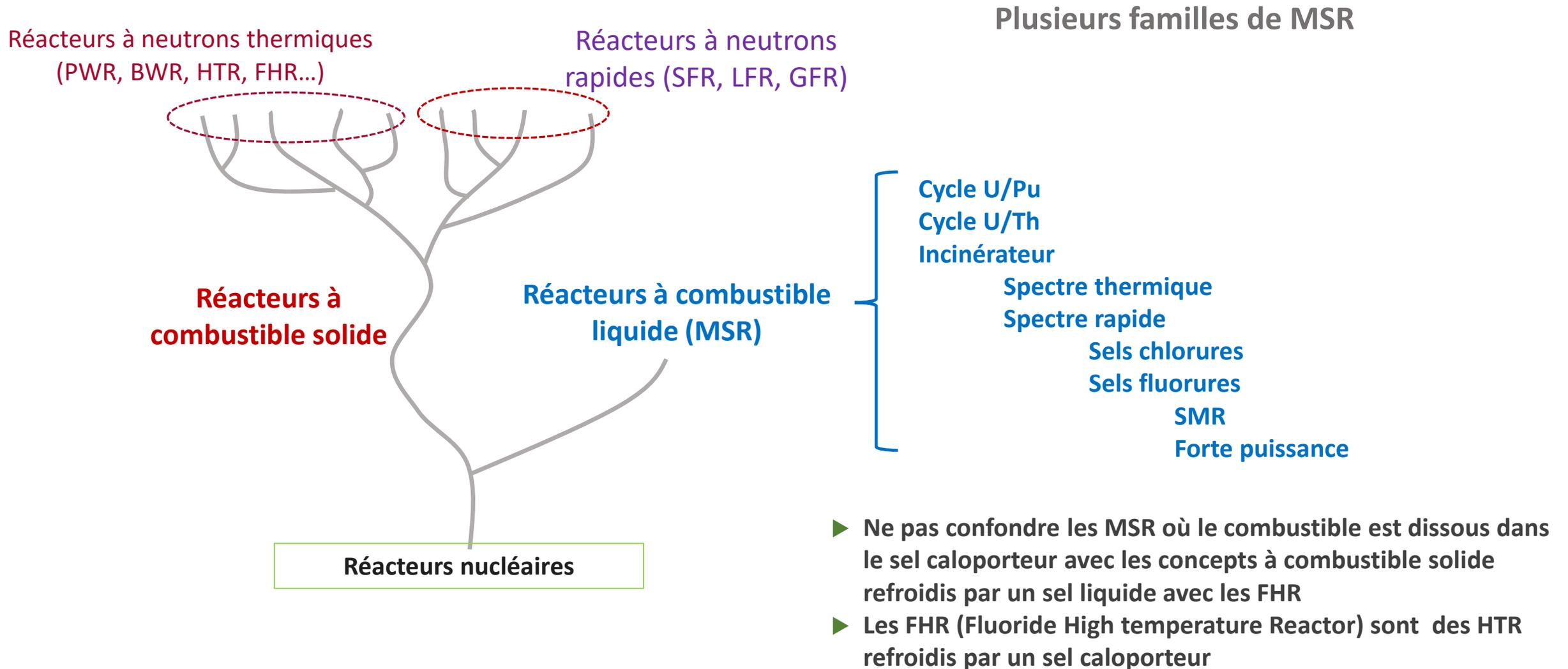
▶ **Sels chlorures retenus en spectre rapide**

Température de fonctionnement potentiellement plus basse

Spectre plus rapide

Mieux adaptés au cycle U/Pu (faible solubilité du Pu dans les sels fluorures)

▶ **Dans tous les cas : points de fusion hauts (>300°C), corrosion spécifique, et séparation isotopique nécessaire.**



- Pb des VHTR :
  - Problèmes de tenue des matériaux à haute température
  - Limitations intrinsèques liées à l'utilisation d'un gaz comme fluide de refroidissement (sûreté)
- Propositions de remplacer l'hélium par des sels fluorures, en gardant le combustible solide des HTR
- Un des projets le plus avancé sur le sujet : Rapport du MIT de 2018  
Avec de nombreux essais technologiques sur les matériaux, le contrôle RedOx, les échangeurs sel/sel , les composants, etc.
  - **REX et données utilisables pour les MSR**
- **Mais les FHR = réacteurs à combustible solide !**
  - Pas les avantages d'un combustible liquide
  - Ne rentrent pas dans le cadre des MSR

**Le MSR est souvent associé à tort au cycle utilisant le thorium (cycle Th/U233)**

**Le MSR peut utiliser n'importe quel fertile ou fissile, en mode thermique ou rapide suivant les objectifs**

**Le thorium est un fertile. Le MSR a besoin de fissile pour être critique. Ce fissile peut être l'U235, le Pu voire des actinides mineurs.**

**En fertile, on a environ 300 000 t d'uranium appauvri disponible en France**

**Le cycle TH/U233 ne présente pas d'avantages particuliers, sauf pour les pays qui ont du thorium disponible . Il demande par contre de gros travaux de développement**

- Qu'est-ce qu'un réacteur à sels fondus ?
- **Panorama international**
- Intérêts et verrous de cette filière
- Les MSR en France
- Perspectives

- Pays avec le programme le plus vaste et le plus structuré
- Ensemble des moyens pour un centre de recherche : le SINAP (Shanghai) avec ~1000 personnes
- Objectif : développer le concept sous toutes ses aspects (codes, matériaux, technologie, retraitement) avec des boucles à sels fondus et l'annonce d'un petit prototype pour **2021**
- Prototype sur la base initiale du MSRE : réacteur thermique, sels fluorures, modérateur graphite



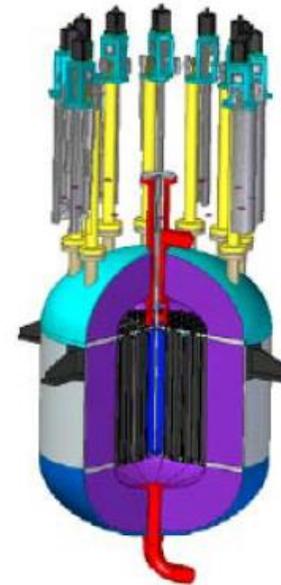
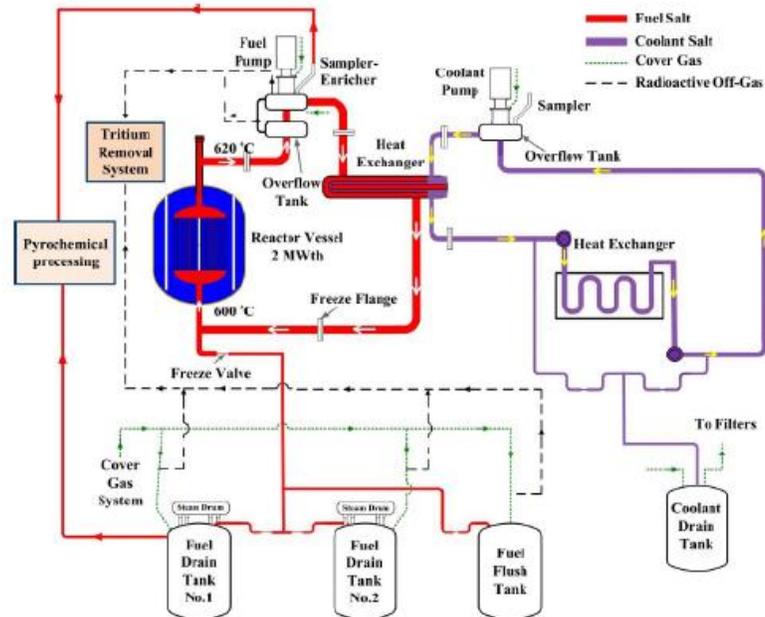
# TMSR-LF1 by SINAP, China

2 MWt test reactor  
(and 168 MWe for TMSR-LF2)

Liquid fuel

Thermal  
(graphite moderator)

Research on Th-U cycle in FLiBe



Construction commencée sur un site dans le désert de Gobi

Une petite équipe travaille à l'**institut Kurchatov** sur le projet MOSART (réacteur de 1000 MWe)

- ▶ Choix d'un spectre rapide
- ▶ Choix de fermeture du cycle / bruleur d'actinides mineurs
- ▶ Développement de matériaux intéressants, de composants et d'un suivi pour la chimie
- ▶ Proposition d'un retraitement en ligne

Par ailleurs : recherches de base effectuées sur les taux de solubilité dans le sel, et sur ses facultés de rétention lorsqu'il se solidifie après une fuite. (cf. présentation des russes effectuée en Octobre au GIF Symposium )

**Annonce par ROSATOM fin 2019 du lancement d'un programme de construction d'un MSR près de Krasnoyarsk / Programme sur 10 ans.**



Dans le monde anglo-saxon : nombreuses start-up proposant aujourd'hui des concepts de réacteurs utilisant les sels fondus

Liste (pas forcément exhaustive) des projets de MSR :

**Integral Molten Salt Reactor 400** (Terrestrial Energy, Canada) *thermal*,

**Molten Chloride salt Fast Reactor** (Terrapower and co, USA) *fast*,

**Transatomic Power Reactor** (Transatomic + MIT, USA) *thermal*, **ThorCon** (Martingale, USA) *thermal*, **Liquid**

**Fluoride Thorium Reactor** (Flibe Energy, USA) *thermal*, **Stable Salt Reactor** (Moltex Energy, UK) *fast*,

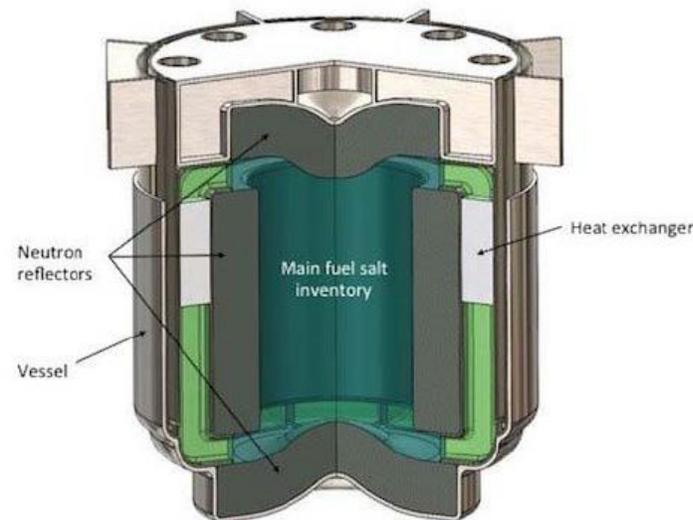
**Molten Chloride Salt Fast Reactor** (Elysium industries, USA) *fast*, **Seaborg Waste Burner** (Seaborg technologies, Denmark) *thermal*, **Copenhagen Atomics Waste Burner** (Copenhagen Atomics, Denmark) *thermal*, **Thorenco Process Heat Reactor**, etc.

Si certaines ne semblent présenter que du dessin et du concept, certaines (MIT, Terra Power par exemple) ont des boucles d'essais et font certains développements technologiques.

**Fin décembre 2020 annonce du DOE de soutien au MCRE , maquette de MSR chlorure Southern/Terrapower à l'INL (environ 100M\$ sur 7 ans dont 90 du DOE)**

## Molten Chloride Fast Reactor by Terrapower, USA

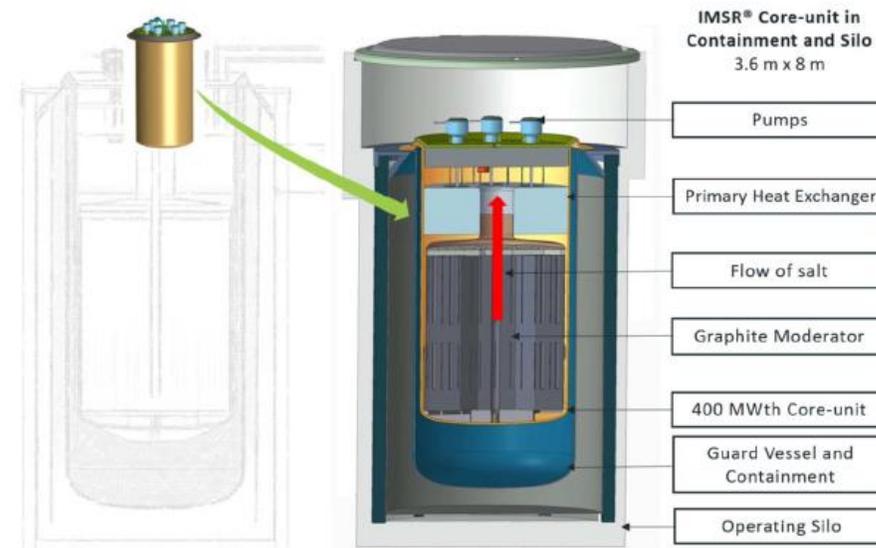
30 MWth (test reactor)	Liquid fuel	Fast (Breeder or burner)	Molten chloride U/Pu cycle (LEU or SNF) (could use thorium)
------------------------	-------------	--------------------------------	-------------------------------------------------------------------



**Terrapower (Bill Gates) investit de plus en plus sur son MCFR, en parallèle de leur projet de SFR**  
**Options intéressantes car proche du contexte français (U/Pu, chlorures, rapide)**  
**Maquette critique en cours de design**

## ISMR400 by Terrestrial Energy, Canada

400 MWt	Liquid fuel	Thermal (burner)	LEU in NaF – RbF – UF4 (or LiF-BeF2-UF4)
---------	-------------	---------------------	---------------------------------------------



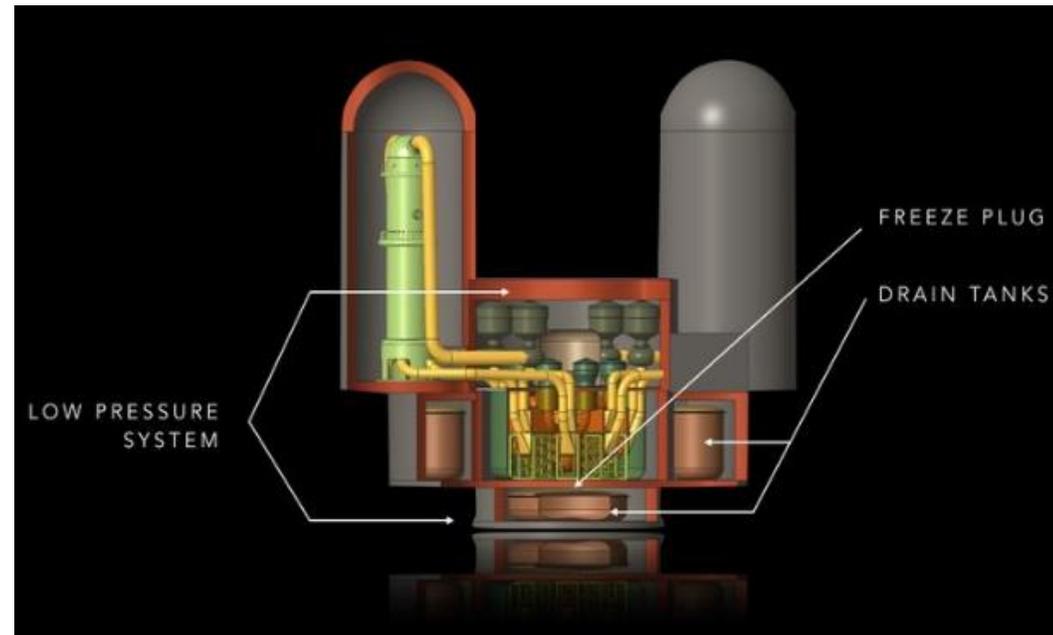
**Reprend des options du MSRE**

**Licensing de MSR le plus avancé en Amérique du Nord avec l'AS canadienne**

**Concept de batterie : pas de retraitement, au bout de 7 ans on change cuve+sel**

**Implantation en Alberta pour utilisation de chaleur pour les sables bitumineux**

- Projet de réacteur d'une puissance de 1000 MWe
- Objectif : cycle fermé du combustible, en utilisant du combustible usé  
→ Choix d'un spectre rapide et d'un sel chlorure
- Fondé en 2015, la start-up compte une quarantaine d'employés.



## Grande variété dans les choix techniques proposés

- Absence d'une solution faisant consensus
- Foisonnement : startups US/Canada, Instituts de R&D, projet chinois, projet russe...
- Illustration de l'intérêt des MSR : la versatilité = grande liberté de design !

**Conclusion** : c'est le choix des objectifs qui détermine certains choix techniques de base : en particulier spectre thermique ou spectre rapide.

### - Exemples :

Si objectif de privilégier la continuité technologique avec le MSRE ou de regarder une filière thorium

- Choix d'un MSR à spectre thermique (plutôt fluorures)

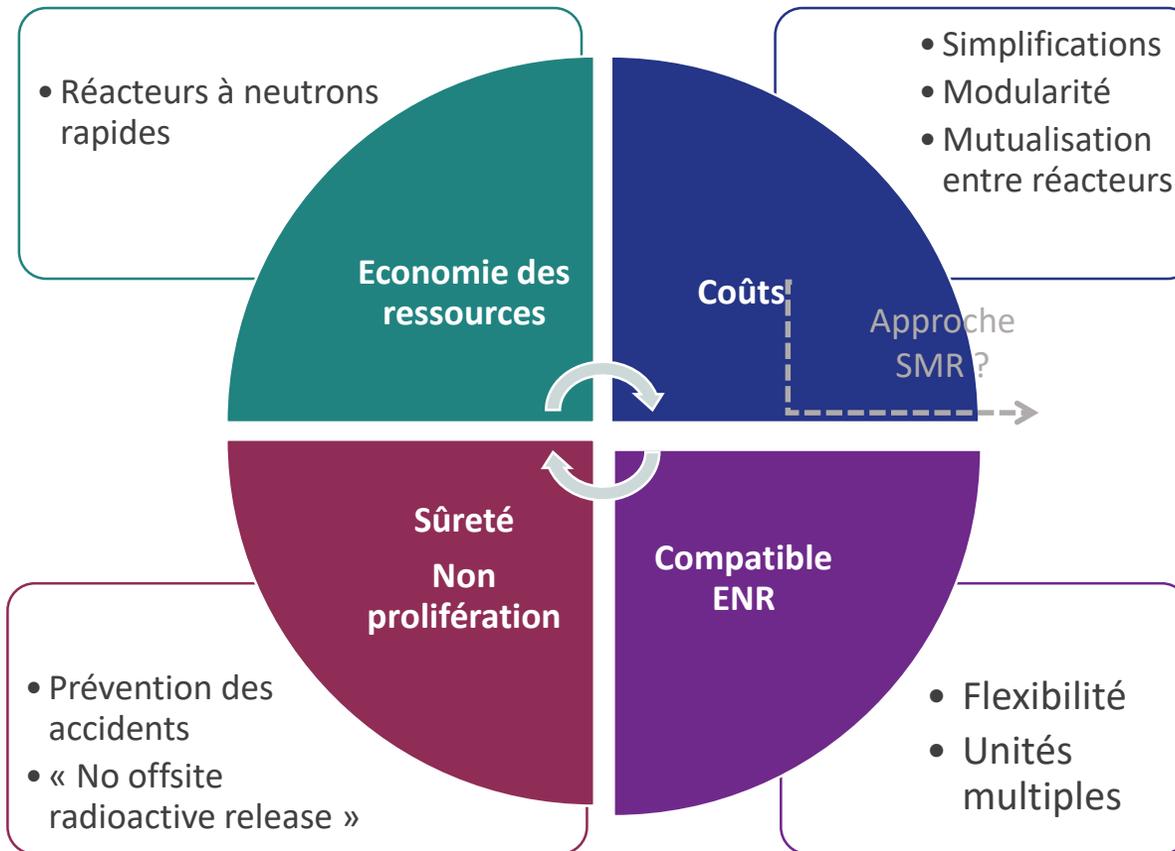
Si objectif de fermeture du cycle

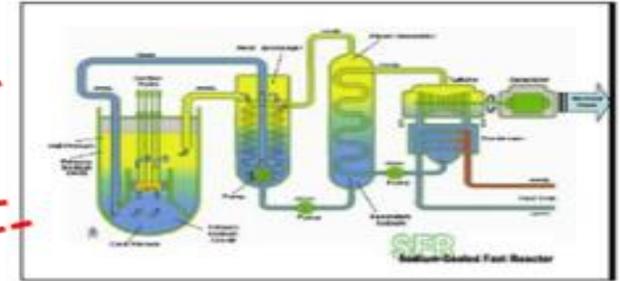
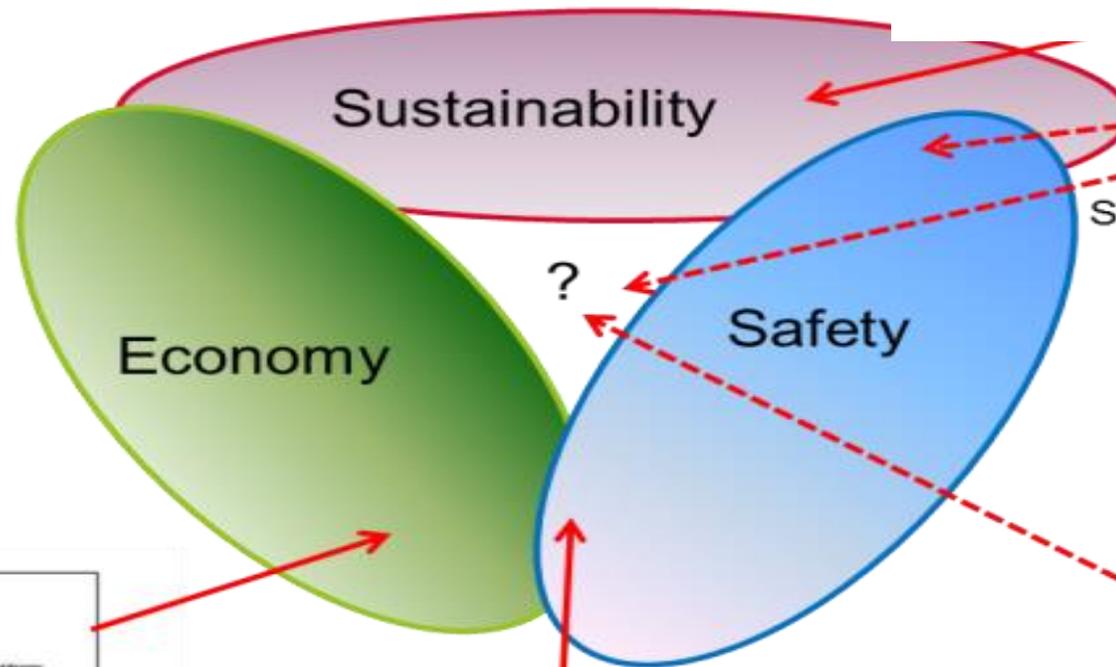
- Choix d'un MSR à spectre rapide.(plutôt chlorures)

Un cadre international d'échanges : le forum Generation IV avec un System Steering Committee

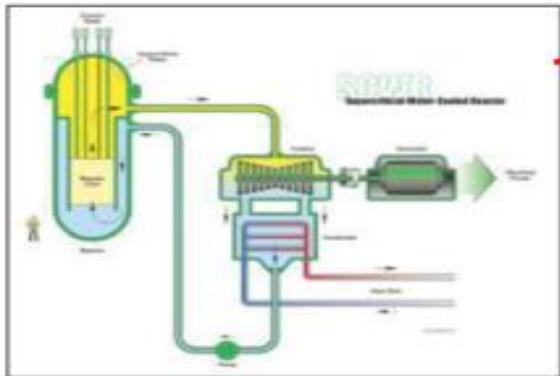
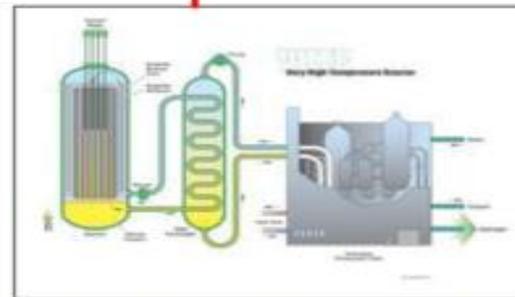
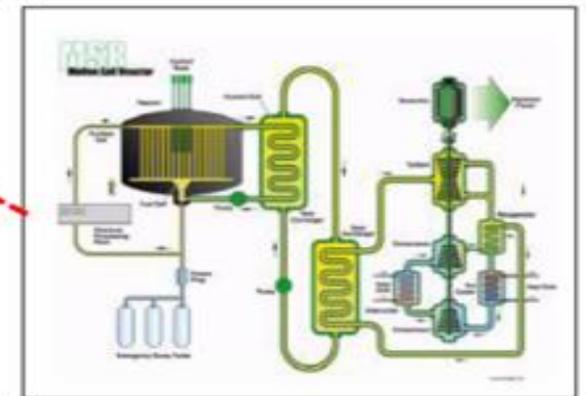
Trois projets en construction ( Chine, Russie, US)

- Qu'est-ce qu'un réacteur à sels fondus ?
- Panorama international
- **Intérêts et verrous de cette filière**
- Les MSR en France
- Perspectives





ASTRID

SMR CADOR ? *Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)**Supercritical Water-cooled Reactor (SCWR)**Very High Temperature Reactor (VHTR)**Molten Salt Reactor (MSR)*



## Avantages potentiels

### Gestion des matières

- Utilisation du Pu issu des REP
- Transmutation
- Alimentation en ligne de sel combustible

### Sûreté intrinsèque

- Pas d'accident énergétique
- Contre-réactions fortement négatives
- Pas de pression
- Solidification du sel en cas de fuite

### Flexibilité

- Suivi de réseau facilité dans un mix avec beaucoup de renouvelable intermittent
- SMR ou gros réacteur
- Sur ou sous-générateur avec le même design

## Verrous technologiques

### Chimie du sel

- Problèmes de solubilité
- Risques de précipitation
- Risques chimiques de manière générale

### Matériaux

- Corrosion
- Haute température
- Irradiation (la cuve est directement exposée au combustible)

### Sûreté en fonctionnement

- Procédures d'exploitation/maintenance
- Gestion des fuites
- Gestion des PF
- Radioprotection

### Technologies

- Pompes, échangeurs, vannes, instrumentation, traitement du sel, purification, PF gazeux

**... et référentiel de sûreté à définir dans un contexte international**

- ▶ **Réacteur rapide : possibilité d'incinération de produits très divers, utilisation possible des matières issus des REP et du retraitement (Pu, MOX usagés, AM), ainsi que possibilité de valoriser l'uranium appauvri**
- ▶ **Traitement du sel par batch ou en continu avec adjonction de combustible liquide et purification/traitement sur site >> moins de complexité que le retraitement/séparation/transport pour la (re)fabrication de combustible solide**
- ▶ **Minimisation potentielle des quantités de déchets finaux**  
Pas de gaines, de tubes hexagonaux, moins de structures que le SFR  
Pas de sortie prématurée du combustible en raison de la tenue limitée des gaines SFR : **bonne incinération en continu**

- **Dans un RNR à combustible solide : faisable, complexe et long**

Retrait du combustible usé du centre du cœur et refroidissement en stockage interne

Retrait de l'assemblage et lavage

Transport des assemblages irradiés

Découpage en usine et retraitement (dissolution, séparation du Pu, retour à l'état solide)

Transport vers l'usine de fabrication de combustible

Fabrication du combustible

Transport des assemblages neufs vers le réacteur

Insertion de l'assemblage en cœur

+ impact sur la gestion de la réactivité en cœur

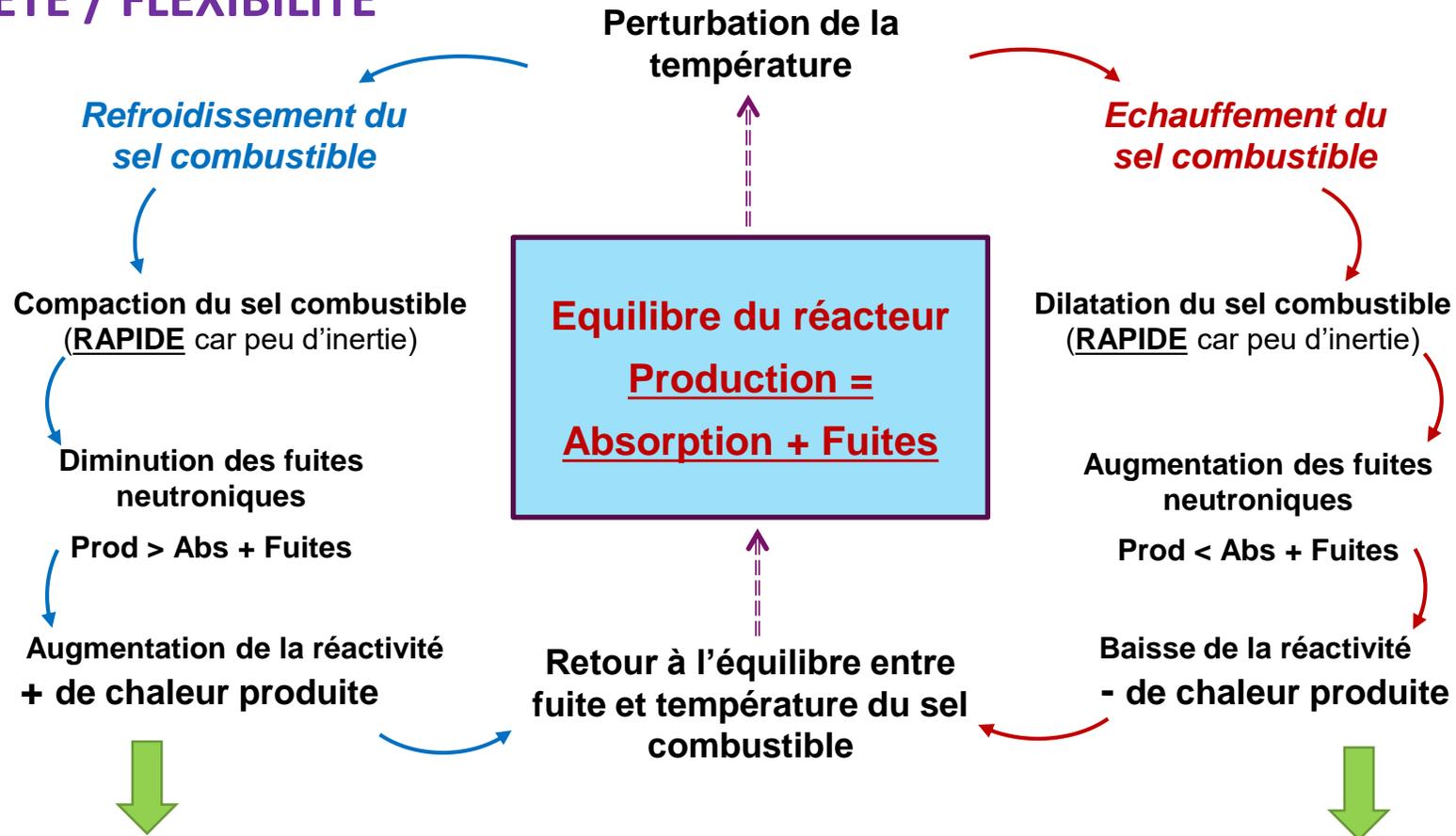
- **Dans un MSR : théoriquement plus simple (notamment transports en moins si co-localisation)**

Extraction régulière de sel combustible (contenant le Pu) → Passage dans l'unité de retraitement sur site (pour séparation des lanthanides et extraction des poisons éventuels) → Réinjection du sel combustible (contenant le Pu) dans le circuit combustible → Irradiation en fonctionnement

**MAIS nécessite un atelier de traitement du sel soit accolé au réacteur , soit mutualisé sur plusieurs réacteurs**

- ▶ 1- Pas de relâchement d'énergie mécanique en cas d'excursion neutronique : le cœur est déjà fondu et dans sa configuration la plus dense et la plus critique
  - ▶ 2- Coefficients de contre réaction fortement négatifs avec des temps de réaction extrêmement courts : réacteur auto-stabilisant
  - ▶ 3- Pas de pression du caloporteur
  - ▶ 4- En cas de fuite de la première barrière : solidification du sel (piégeage des PF et des matières) et pas de réaction chimique avec l'air
  - ▶ 5 – Possibilité de « vidange rapide » réversible du sel vers des réservoirs dédiés
  - ▶ 6 – Potentiellement seulement 2 barrières de confinement (à démontrer !)
- **Référentiel de sûreté différent des REP et SFR à construire dans un cadre international**

## SURETE / FLEXIBILITE



Pilotage réactif par les circuits secondaires :  
augmentation de la vitesse des pompes secondaires  
>> augmentation de la puissance  
**Suivi de charge facilité**

**Grande sûreté intrinsèque** : peu  
d'échauffement même en cas de fortes  
insertions de réactivité

## ECONOMIE

### ► Des attraits potentiels

- Haut burnup non limité par la durée de vie des gaines ou le comportement du combustible solide
- Multirecyclage simplifié sur site (SFR : transports, fabrication)
- Simplicité du réacteur : peu de structures internes, peu de structures mobiles dans le primaire
- Pas de pression et pas de réaction exothermique pouvant aggraver le confinement (batiment réacteur)
- Hautes températures : rendement amélioré et potentielle utilisation de la chaleur (cogénération, H<sub>2</sub>)

### ► Et des doutes...

- Très faible maturité technologique => programme de R&D et qualification très important
- Maîtrise de la physico-chimie du sel et de son traitement : peu de REX, peu de données, peu d'études
- Durée de vie potentiellement limitée (haute température et irradiation des structures primaires)
- Procédés de retraitement à définir : quel coût ?
- Exploitation/radioprotection/redémarrage après incident
- Maintenance et inspection en service complexes
- Nombreux systèmes de préchauffage
- Quels safeguards pour la non-prolifération ?

## POINTS DURS

1. Matériaux à haute température, corrosion des PF
2. Chimie du sel : maîtrise de la composition durant la vie du réacteur, maîtrise des solubilités pour toutes les conditions de fonctionnement
3. Traitement du sel combustible : quelles matières ? actinides mineurs ? quels procédés ? Continu ou batch ? Quelle interaction réacteur/usine ? Cycle du combustible à préciserer...
4. Technologies : pompes, échangeurs, vannes, instrumentations...
5. Exploitation : interaction primaire/secondaire/SCE, démarrage/arrêt, gestion des fuites, radioprotection, maintien du sel liquide, maintenance et arrêt de tranche...

- Qu'est-ce qu'un réacteur à sels fondus ?
- Panorama international
- Intérêts et verrous de cette filière
- Les MSR en France
- Perspectives

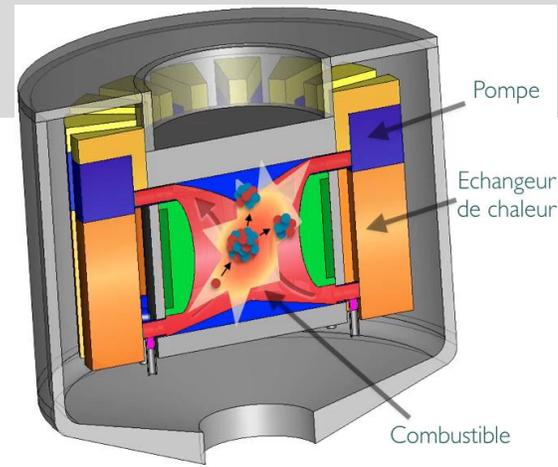
- ▶ Filière étudiée *irrégulièrement* par EDF & CEA : années 70 puis fin années 90
- ▶ Années 2000 au CEA : études focalisées sur SFR puis ASTRID
- ▶ Travaux du CNRS depuis plus de dix ans
  - Beaucoup de problématiques travaillées et posées
  - Outils de calcul développés par le CNRS
  - Connections avec d'autres équipes internationales
- **Très bonne base sur laquelle s'appuyer (néanmoins historiquement concept fluorures + cycle thorium, études chlorures seulement depuis 2019)**
- ▶ **Projets européens :**
  - Le projet européen SAMOFAR (fin en 2019) a utilisé le MSFR du CNRS comme concept de base pour ses études.
  - Un nouveau projet SAMOSAFER a débuté (2019/2023)
- ▶ **Collaborations en France**
  - Retour du CEA suite au séminaire « état de l'art » de mars 2018 à Massy CEA/CNRS/FRA/EDF/IRSN/ORANO et à l'abandon du projet ASTRID.
  - Echanges informels et préparation de papiers communs (ICAPP, PHYSOR) entre CEA/CNRS et Framatome

## ➤ Activités de recherche au CNRS/universités depuis 20 ans sur les RSF

- **Concept « MSFR de référence »** (régénérateur en cycle Th/<sup>233</sup>U en sel fluorure) étudié et optimisé depuis plus de 10 ans, au cœur des projets européens EVOL, SAMOFAR, SAMOSAFER + GIF / IAEA : **cœur torique d'environ 2,3mx2,3m pour 18m<sup>3</sup> de sel combustible**
- **Versions alternatives** : incinérateur d'actinides en sel chlorure (collaboration avec ORANO depuis 2019), régénérateur en cycle U/Pu et sel chlorure en version de grande puissance (collaboration CEA depuis 2019) ou SMR (collaboration Framatome depuis 2016)

## ➤ Etudes menées au CNRS : simulations/sûreté/design/chimie (LPSC, IPNO, SUBATECH)

- Simulations en neutronique et physique des réacteurs
- Analyses de sûreté des réacteurs à sels fondus
- Etudes de design du cœur
- Etudes expérimentales en chimie des sels fondus
- Boucles expérimentales FFFER et SWATH (@V. Ghetta)



## ➤ Caractéristiques techniques du MSFR

- Réacteur compact et géométrie du cœur simple, design intégré (échangeurs de chaleur dans la cuve réacteur)
- Spectre neutronique rapide
- Refroidissement assuré par le combustible en circulation
- Coefficients de contre-réaction (température et vide) tous négatifs

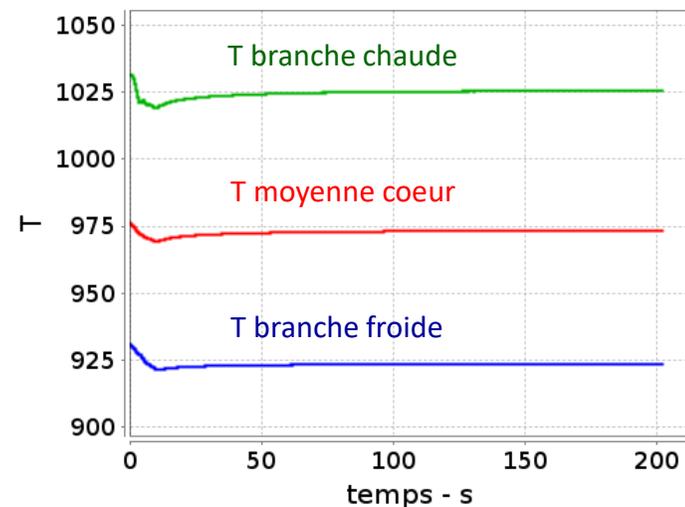
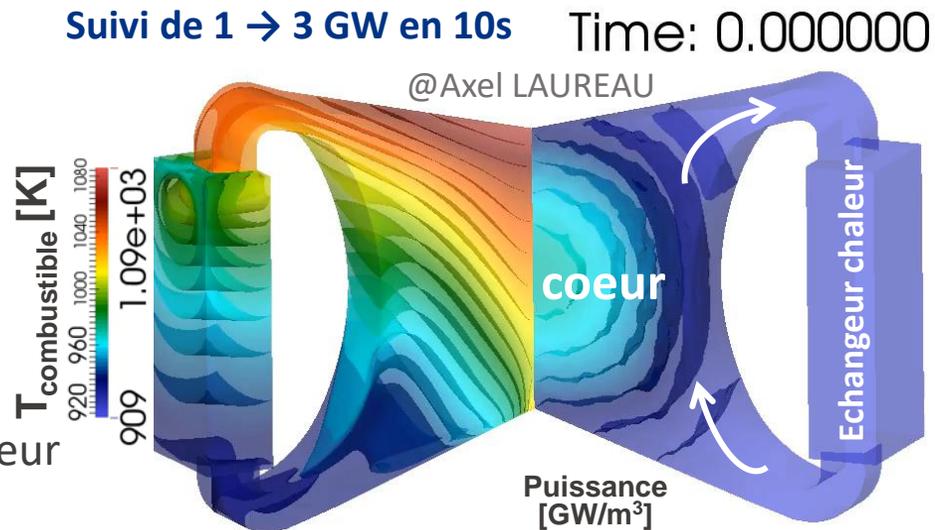
## ➤ Développements de codes génériques adaptés aux RSF

- Code couplé neutronique « Transient Fission Matrix » - thermohydraulique CFD (cf. thèse A. Laureau)
- Code de neutronique Monte-Carlo en évolution sous contraintes REM (@D. Heuer)
- Simulateur de pilotage : code LiCore (cf. thèse A. Laureau) couplé à la plateforme ALICES de CORYS

**Besoins** : souplesse d'utilisation, marges de sûreté, pas de fatigue des systèmes, coût d'investissement réduit pour pouvoir fonctionner à puissance partielle

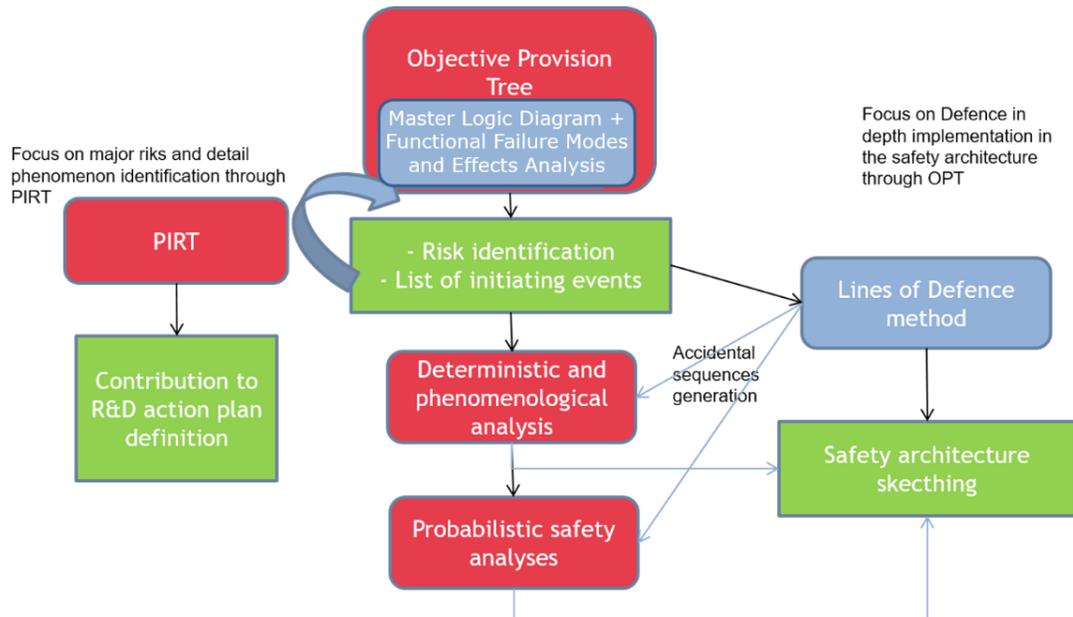
### ➤ Caractéristiques du MSFR :

- Chaleur nucléaire déposée directement dans le caloporteur ⇒ **grande souplesse de pilotage du cœur** qui suit parfaitement la demande du réseau
- Pilotage assuré par la chaleur extraite **sans nécessiter de barre de contrôle**
- Possibilité de débit ajustable du combustible liquide ⇒ **températures moyennes des parois stables** durant le suivi donc peu de fatigue thermique
- Grande stabilité intrinsèque ⇒ **marges de sûreté respectées**



► Développement d'une approche de sûreté dédiée aux réacteurs à combustible liquide circulant et analyse de risques du MSFR : cf thèse de Delphine Gérardin (2015-2018) et projet européen SAMOFAR (2015-2019)

In2p3



► Collaboration CNRS/IRSN/Framatome/POLIMI/EDF : développement d'une méthodologie d'analyse de risques, identification des initiateurs d'accidents, confirmation des avantages en terme de sûreté du MSFR, retours sur design, évaluation des challenges et besoins de recherches liés à la sûreté nucléaire

LoD method  
already applied

LoD method  
under  
application/to  
be applied

Selected Postulated Initiating Events	Types
Loss of main heat sink	Incident
Overcooling at start up or low power	Accident
Leak of an heat exchanger between the fuel circuit and the intermediate circuit	Accident
Leak of a fuel salt storage tank	Accident
Loss of electric power supply	Accident
Fuel salt leak - rupture of the core vessel	Accident
Reactivity insertion: Addition of fuel salt with a too high concentration of fissile matter	Incident
Reactivity insertion: Fertile blanket loading with fuel salt	Limiting event



- ▶ Enjeu de la gestion du plutonium issu des REP : les RNR sont nécessaires pour réduire drastiquement la toxicité des déchets et optimiser l'utilisation des matières
- ▶ Certains clients d'ORANO ne sont pas en mesure d'utiliser le plutonium issu du traitement de leurs combustibles
- ▶ Intérêt d'étudier la faisabilité d'un MSR consommateur de plutonium (« convertisseur Pu »)
- ▶ Intérêt pour le MSR à spectre rapide et sel chlorure (maîtrise de la chimie du chlore, synergies possibles avec La Hague)
- ▶ Pas de combustible solide à fabriquer: possibilité de rouvrir le sujet de la conversion des actinides mineurs dans le futur?



- ▶ Programme de R&D sur les réacteurs innovants, y compris MSR
- ▶ Collaboration depuis 2016 avec le CNRS (thèses..)
- ▶ Participation aux projets européens sur les MSR (SAMOSAfer...)
- ▶ Création d'une Ecole du Design

- Un constat d'éloignement dans le temps de la perspective de déploiement de RNR-Na industriels, pour des raisons économiques et de disponibilité de l'U. Arrêt du projet ASTRID mais nécessité de maintenir les compétences pour garder l'option ouverte.
- **L'objectif de fermeture du cycle est maintenu dans la PPE.**
- Enjeux pour atteindre le recyclage complet sur le long terme :
  - Nécessité de recourir aux RNR
  - Filière RNR sodium la plus mature à consolider
  - Mais intérêt d'évaluer les verrous des MSR qui ont un fort potentiel mais ne sont pas actuellement constructibles

## ETUDES D'ESQUISSES MSR

Préciser la faisabilité du concept MSR rapide. Hypothèse de départ : petite taille et sel chlorurE. Seul un remontage permet d'appréhender la faisabilité en adressant les thèmes transverses (sûreté, exploitation, traitement du sel, technico-économie...) et en hiérarchisant les verrous

### ► Programme pluriannuel mis en place pour évaluer la faisabilité

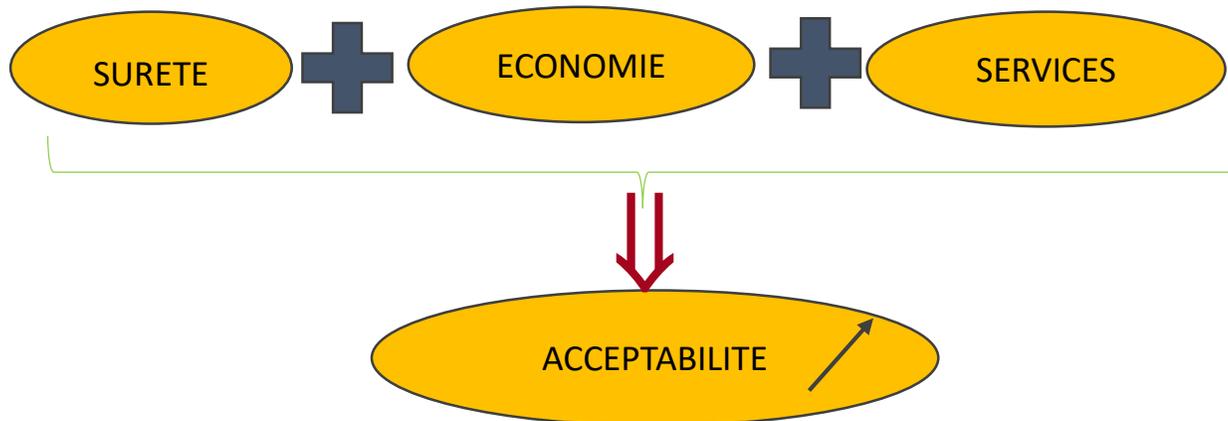
- Cahier des charges : spectre rapide, sel chlorure, incinérateur Pu et/ou isogénérateur
- Analyses multicritères de choix du sel, base de départ : NaCl- $UCl_3$ - $PuCl_3$
- Etudes d'esquisses : faisabilité neutronique, remontages, études de composants, lien avec les études de cycle
- Mobilisation de l'expertise CEA sur chimie/corrosion/matériaux/outils de couplage autour des problématiques MSR
- Analyse des concepts étrangers
- Identification et hiérarchisation des verrous
- Définition d'un référentiel de sûreté international (proposition d'une Task Force au sein du GIF)

- Qu'est-ce qu'un réacteur à sels fondus ?
- Panorama international
- Intérêts et verrous de cette filière
- Les MSR en France
- **Perspectives**

- **COUTS** : nécessité de maîtriser les couts des futurs réacteurs
- **SURETE** : crainte de l'accident de type Tchernobyl ou Fukushima
- **DECHETS NUCLEAIRES** : ressenti comme mettant la filière dans l'impasse
- **RESSOURCES** : importations, réserves en U limitées à long terme
- **SOUPLESSE** : besoin de flexibilité pour compenser l'intermittence des ENR

Les réacteurs de 4<sup>ème</sup> Génération visent à améliorer chacun des « défauts ressentis » de la filière nucléaire  
La faisabilité des MSR rapides est à regarder sérieusement car ses avantages théoriques répondent à ces enjeux

- ▶ 1- Economie d'uranium
- ▶ 2- Minimisation des quantités de déchets
- ▶ 3- Possibilités de multirecyclage Pu, de transmutation
- ▶ 4- Suivi de réseau très rapide et très souple en support des fluctuations des ENR intermittentes
- ▶ 5- Sureté intrinsèque
- ▶ **Facteurs également importants pour l'acceptabilité sociale**



**MAIS beaucoup de verrous à surmonter :**  
matériaux, corrosion, exploitation,  
technologies, retraitement, business  
model...



**« L'équipe de France du nucléaire » se doit  
d'évaluer sérieusement cette filière, les  
compétences sont là et c'est la bonne  
opportunité !**

**Le MSR peut être un « game-changer » de l'acceptabilité de l'énergie nucléaire**

***Et en même temps...***

**Attention aux fausses promesses !  
Le réacteur simple, sûr et pas cher ne l'est souvent que sur le papier**

*La simplicité est la sophistication suprême*

*Léonard de Vinci*

*Ce qui est simple est faux. Ce qui est compliqué est inutilisable.*

*Paul Valéry*



**Merci de votre attention**