

---

# Bilan du projet EVOL : système MSFR

E. MERLE-LUCOTTE

LPSC / IN2P3 / CNRS – Grenoble INP / PHELMMA



# Concept de Molten Salt Fast Reactor (MSFR)

## Avantages d'un combustible liquide :

- Irradiation uniforme du combustible (pas de plan de chargement)
- Chaleur déposée directement dans le caloporteur
- Possibilité de reconfigurer le cœur en quelques minutes
  - Une configuration pour optimiser la production d'énergie en gérant le risque de criticité
  - Une configuration pour un stockage avec refroidissement passif
- Possibilité de retraiter le combustible sans arrêter le réacteur

## + réacteur Gen4 ⇒ étape 1 = Optimisation neutronique des RSF :

- Sûreté : coefficients de contre-réaction négatifs
- Durabilité : faibles dégâts d'irradiation en cœur
- Déploiement : bonne régénération du combustible + inventaire fissile initial réduit



## Définition en 2008 d'un concept innovant de RSF à spectre de neutrons rapide, baptisé MSFR (Molten Salt Fast Reactor)

- Tous les coefficients de contre-réaction très négatifs
- Pas de matériaux dans la zone de haut flux = réduction de la production de déchets de type « éléments de structure irradiés » et des interventions en cœur
- Spectre rapide ⇒ bonne régénération de la matière fissile + amélioration de l'incinération des transuraniens



### R&D objectives

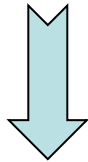
The renewal and diversification of interests in molten salts have led the MSR provisional SSC to shift the R&D orientations and objectives initially promoted in the original Generation IV Roadmap issued in 2002, in order to encompass in a consistent body the different applications envisioned today for 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 performance than the VHTR and passive safety potential

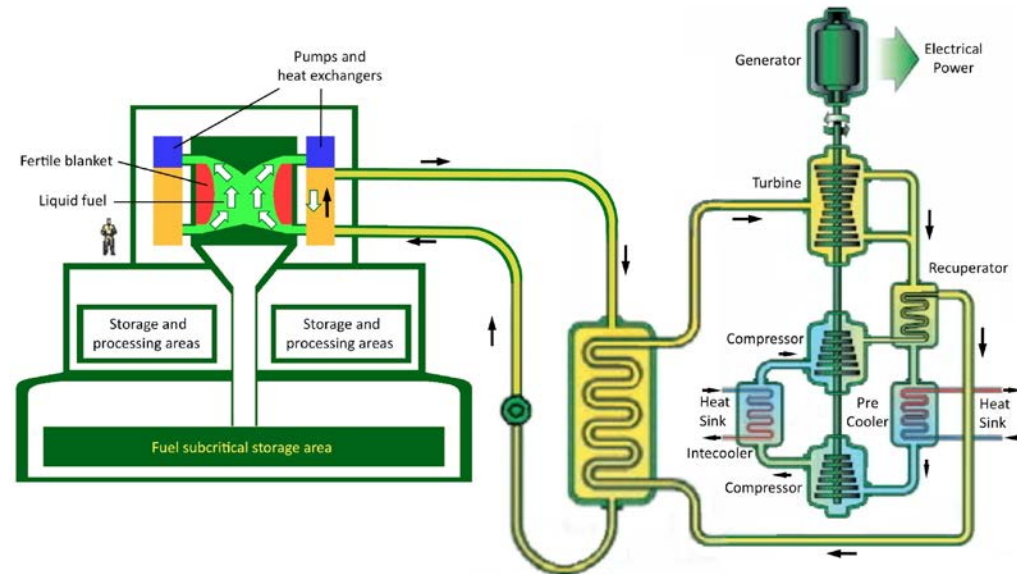
# Concept de Molten Salt Fast Reactor (MSFR)

A présent : études nécessitant des expertises pluridisciplinaires (physique des réacteurs, chimie, sûreté, matériaux, design...)



## Cadres de collaboration au niveau :

- Mondial : forum international Génération 4 (GIF)
- Européen : projet collaboratif Euratom/Rosatom EVOL (FP7) – projet SAMOFAR (H2020) ?
- National : programmes interdisciplinaires PACEN (PCR-ANSF, GNR GEDEPEON) puis NEEDS (PF-SN), projet structurant de Grenoble INP



# Molten Salt Fast Reactor : Cadre européen



## Projet européen "EVOL"

### Evaluation and Viability Of Liquid fuel fast reactor

7<sup>ème</sup> PCRD (2011-2013 – 1 M€) : coopération Euratom/Rosatom

**Objectifs :** Proposer la meilleure configuration de design du MSFR, et donner des pistes pour la définition d'un démonstrateur

- Recommendations for the design of the core and fuel heat exchangers
- Definition of a safety approach dedicated to liquid-fuel reactors - Transposition of the defence in depth principle - Development of dedicated tools for transient simulations of molten salt reactors
- Determination of the salt composition - Determination of Pu solubility in LiF-ThF<sub>4</sub> - Control of salt potential by introducing Th metal
- Evaluation of the reprocessing efficiency (based on experimental data) – FFFER project
- Recommendations for the composition of structural materials around the core

{ WP2: Pre-Conceptual Design and Safety  
WP3: Fuel Salt Chemistry and Reprocessing  
WP4: Structural Materials



**12 partenaires européens :** France (CNRS: Coordinator, Aubert&Duval, INOPRO, Grenoble INP), EU (JRC – Institute for TransU Elements), Netherlands (Delft University of Technology), Germany (KIT-G, FZD), Italy (Politecnico di Torino), United Kingdom (Oxford University), Czech Republic (Energovyzkum Ltd), Hungary (Budapest University of Technology) + 2 observateurs (Politecnico di Milano, Italy and Paul Scherrer Institute, Switzerland)

**+ Couplé au projet MARS (Minor Actinides Recycling in Molten Salt) de ROSATOM**

Del. n°	Pre-Conceptual Design and Safety	Leader	Person. months	Delivery date
D2.1	Design parameters definition for most stable salt flux	INOPRO	12	Month 12
D2.2	Optimization of pre-conceptual design with good thermal homogeneity	CNRS	15	Month 24
D2.3	Sensitivity studies of the salt flux in the optimized design	CNRS	8	Month 30
D2.4	Evaluation of irradiation damages of structural material	CNRS	5	Month 36
D2.5	Safety approach of fast liquid fuel system	CNRS	5	Month 30
D2.6	Safety analysis - Transient calculations	KIT-G	13	Month 36
D2.7	Design components for MSFR	CNRS	6	Month 30
D2.8	Energy conversion system for MSFR	EVM	6	Month 36
D2.9	Recommendations for MSFR demonstrator pre-conceptual design	CNRS	11	Month 36

⇒ **Benchmark thermohydraulique et design cœur (cf. talk d'Hervé Rouch)**

⇒ **Benchmark neutronique**

# WP2 : benchmark neutronique



**Sel initial :** 77,5%  ${}^7\text{LiF}$  + 22,5% (Th+fissile) $\text{F}_4$   
**Température de fonctionnement :** 675 à 775 °C  
**Puissance :** 3  $\text{GW}_{\text{th}}$  ( $\sim 1,4 \text{ GW}_{\text{él}}$ )

**Inventaire initial d' ${}^{233}\text{U}$  par  $\text{Gw}_{\text{él}}$  :** 3,6 tonnes  
**Alimentation en Th par  $\text{Gw}_{\text{él}}$  :** 1100 kg par an

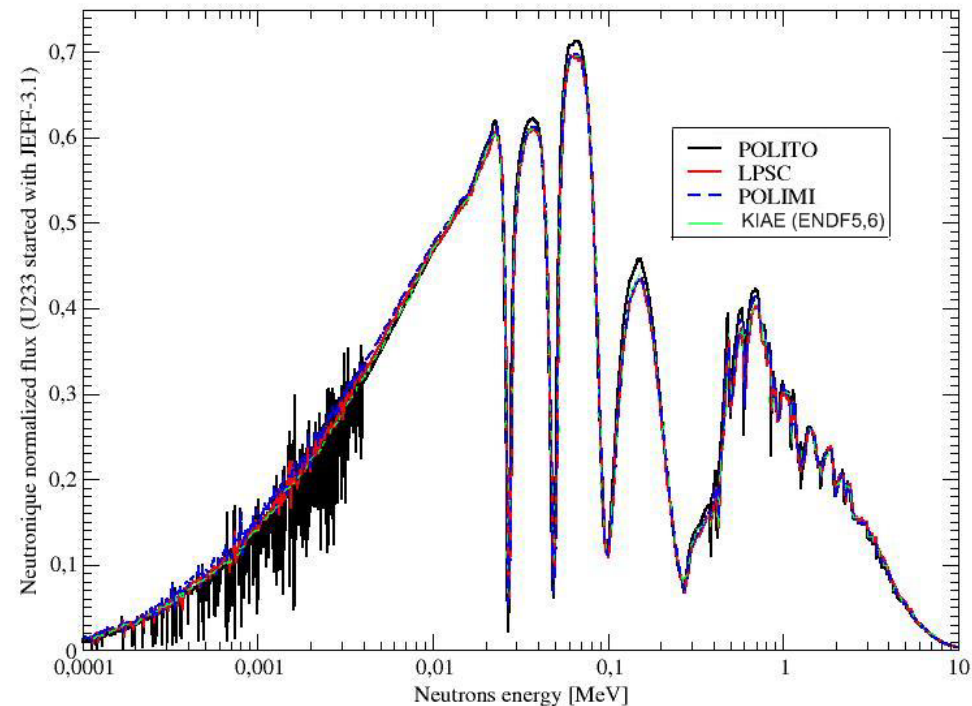
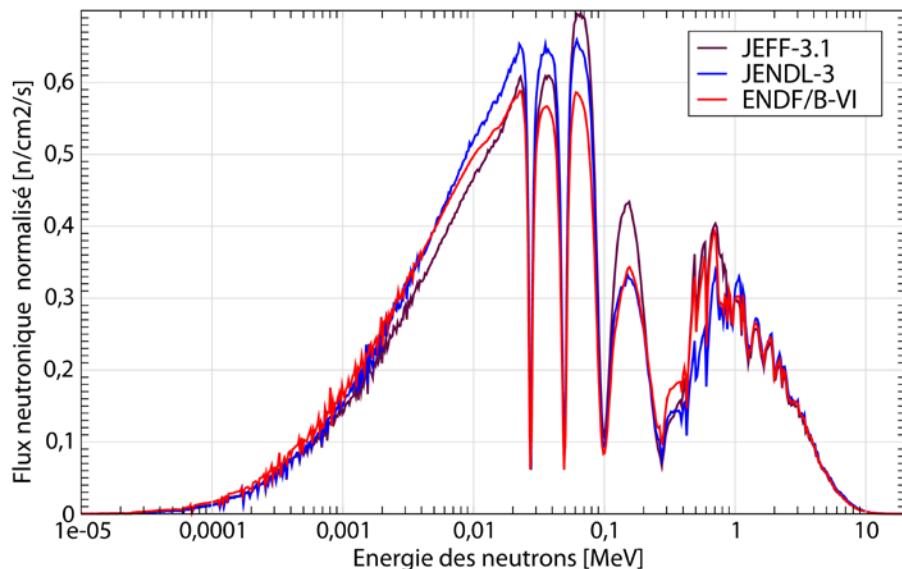
**Diamètre intérieur du cœur :** 2,26 m  
**Hauteur du cœur :** 2,26 m

**Volume de sel combustible :** 18  $\text{m}^3$

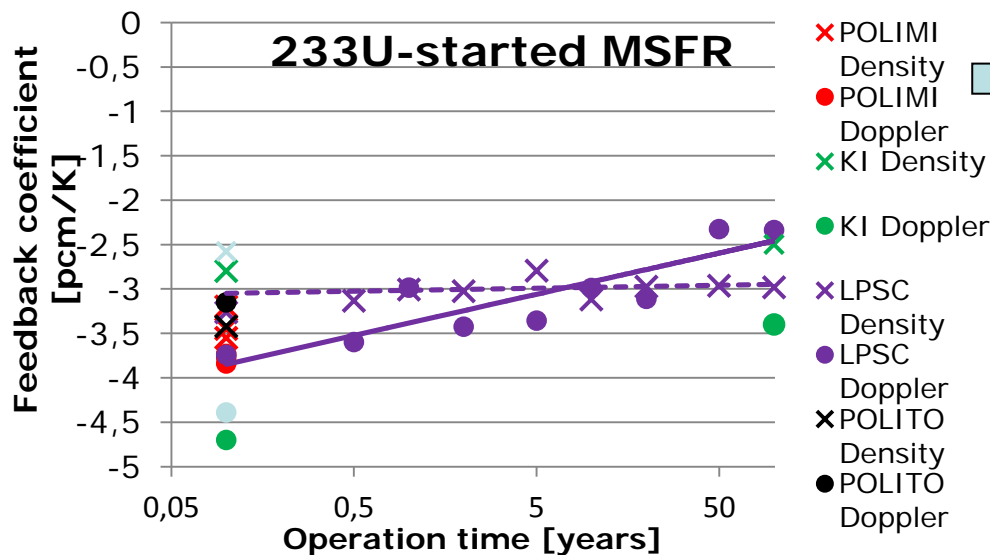
- 1/2 dans le cœur
- 1/2 dans les échangeurs et tuyaux

**Puissance volumique :** 330  $\text{W}/\text{cm}^3$

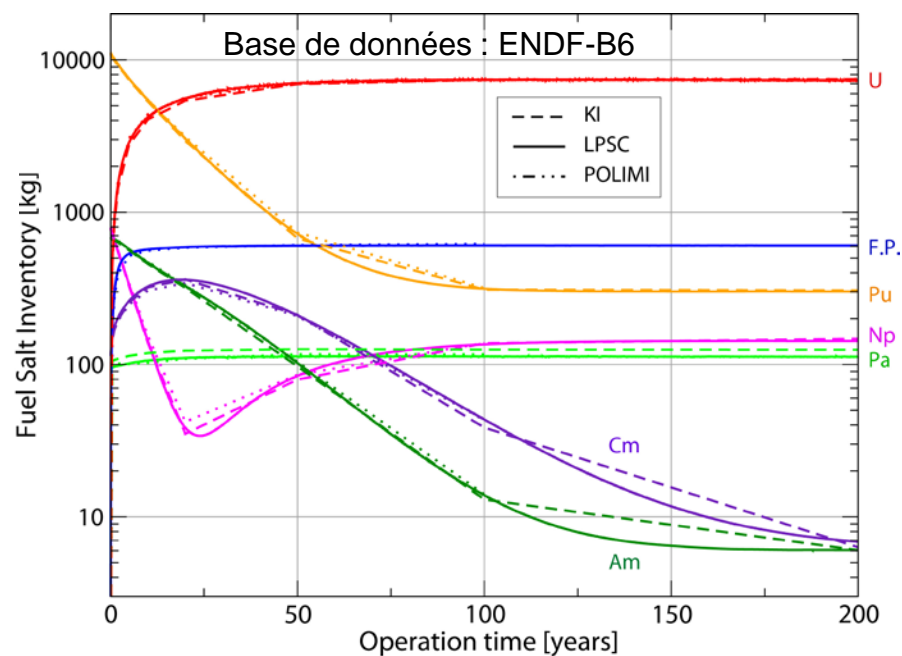
MSFR démarré ${}^{233}\text{U}$		MSFR démarré TRU	
Th	${}^{233}\text{U}$	Th	Trans-U
38 281 kg	4 838 kg	30 619 kg	Pu 11 079 kg
19.985 %mol	2.515 %mol	16.068 %mol	5.628 %mol
			Np 789 kg
			0.405 %mol
			Am 677 kg
			0.341 %mol
			Cm 116 kg
			0.058 %mol



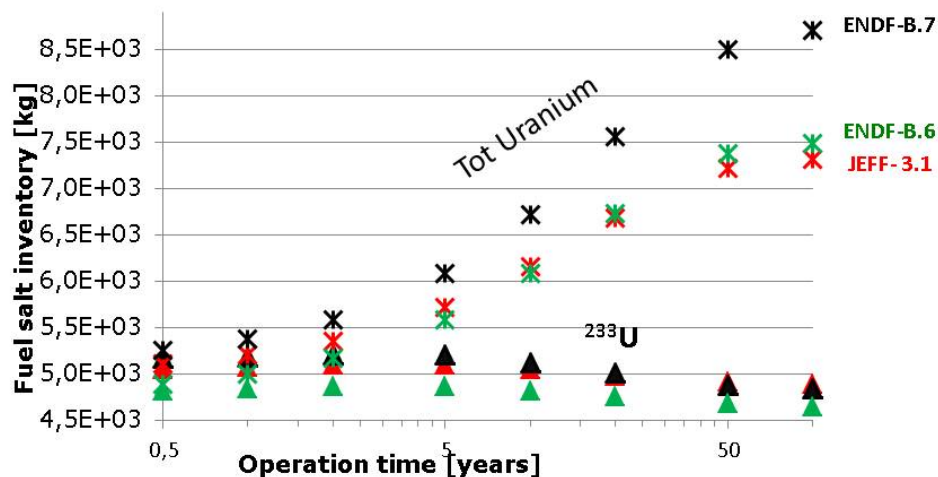
**Calculs statiques (ici BOL) :**  
**Bon accord entre les divers outils – Impact important des bases de données**



**Calculs d'évolution :**  
Coefficients de contre-réactions  
largement négatifs,  $\forall$  l'outil de  
simulation et la base de données



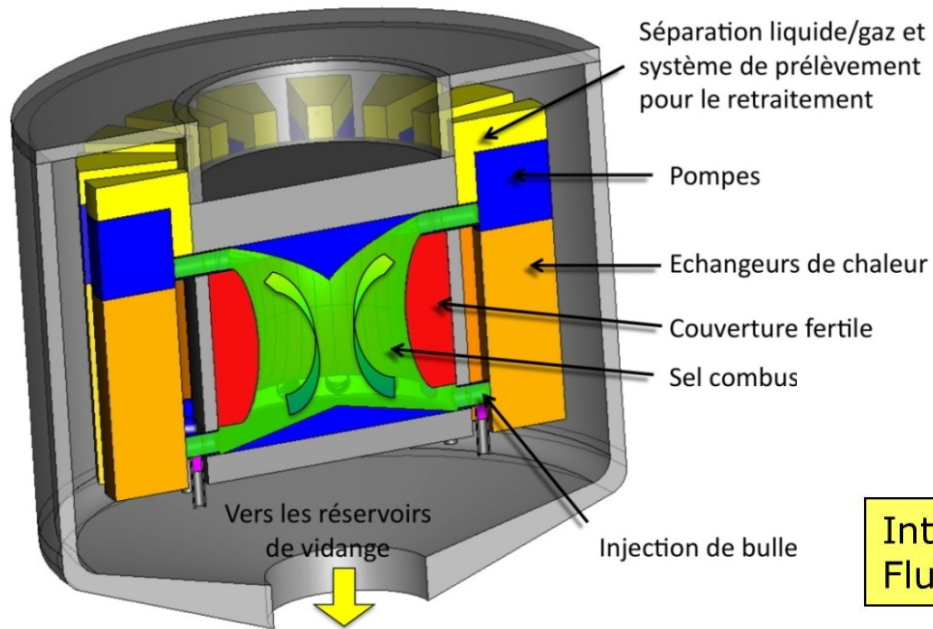
**Calculs d'évolution :**  
Très bon accord entre les divers  
outils de simulation – Impact  
important des bases de données





<b>Del. n°</b>	<b>Pre-Conceptual Design and Safety</b>	<b>Lead beneficiary</b>	<b>Person. months</b>	<b>Delivery date</b>
D2.1	Design parameters definition for most stable salt flux	INOPRO	12	Month 12
D2.2	Optimization of pre-conceptual design with good thermal homogeneity	CNRS	15	Month 24
D2.3	Sensitivity studies of the salt flux in the optimized design	CNRS	8	Month 30
D2.4	Evaluation of irradiation damages of structural material	CNRS	5	Month 36
D2.5	Safety approach of fast liquid fuel system	CNRS	5	Month 30
D2.6	Safety analysis - Transient calculations	KIT-G	13	Month 36
D2.7	Design components for MSFR	CNRS	6	Month 30
D2.8	Energy conversion system for MSFR	EVM	6	Month 36
D2.9	Recommendations for MSFR demonstrator pre-conceptual design	CNRS	11	Month 36





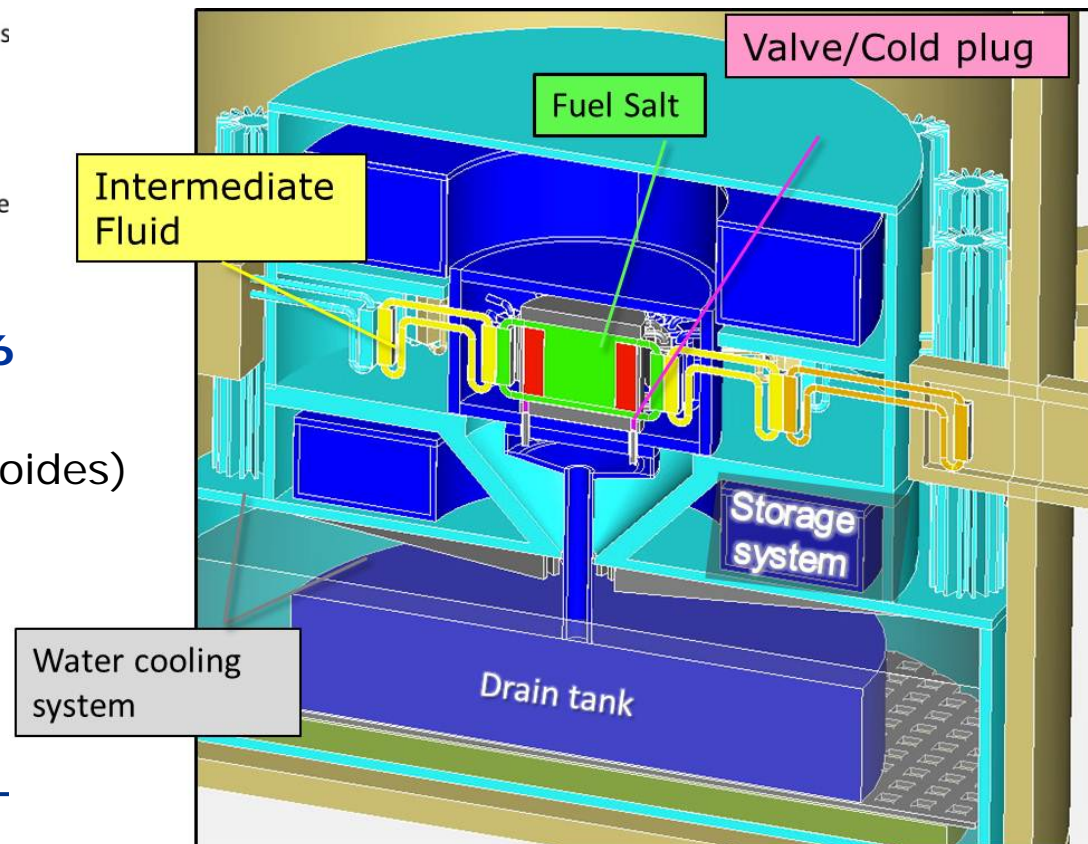
## Circuit combustible = cœur + 16 boucles externes

- Tuyaux (zones chaudes et froides)
- Séparateur bulles/sel
- Pompe
- Echangeur de chaleur
- Injecteur de bulles

## 3 circuits :

- Circuit combustible
- Circuit intermédiaire
- Système de conversion

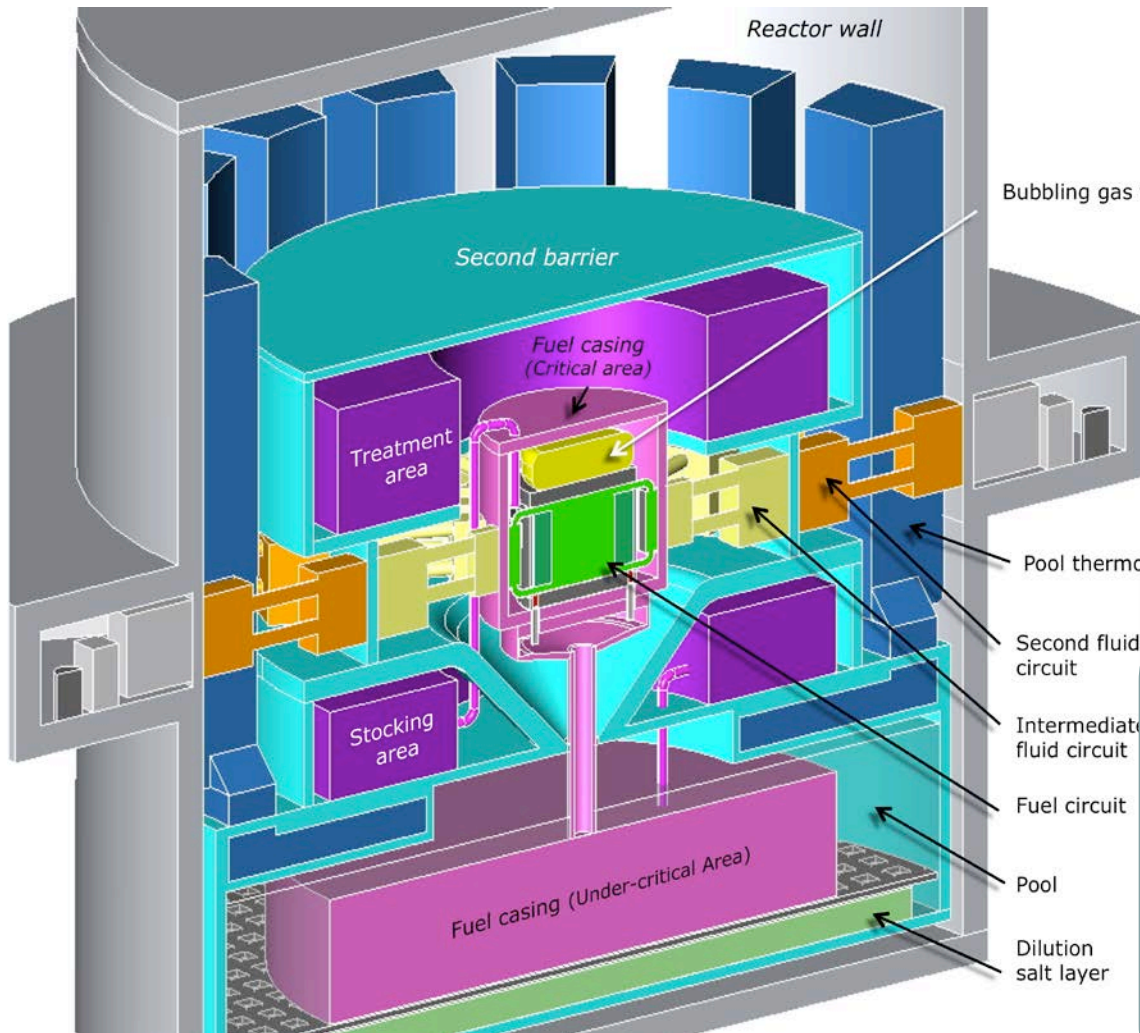
## + Réservoir de vidange



Del. n°	Pre-Conceptual Design and Safety	Lead beneficiary	Person. months	Delivery date
D2.1	Design parameters definition for most stable salt flux	INOPRO	12	Month 12
D2.2	Optimization of pre-conceptual design with good thermal homogeneity	CNRS	15	Month 24
D2.3	Sensitivity studies of the salt flux in the optimized design	CNRS	8	Month 30
D2.4	Evaluation of irradiation damages of structural material	CNRS	5	Month 36
D2.5	Safety approach of fast liquid fuel system	CNRS	5	Month 30
D2.6	Safety analysis - Transient calculations	KIT-G	13	Month 36
D2.7	Design components for MSFR	CNRS	6	Month 30
D2.8	Energy conversion system for MSFR	EVM	6	Month 36
D2.9	Recommendations for MSFR demonstrator pre-conceptual design	CNRS	11	Month 36

⇒ Approche de sûreté (voir session de cet après-midi)

⇒ Identification préliminaire d'accidents caractéristiques



## Accident LOLF (Loss of Liquid Fuel)

→ aucun outil dispo pour l'analyse quantitative mais qualitativement :

- Circuit combustible : structure complexe, connections multiples
- Fuites possibles : collecteurs connectés au réservoir de vidange



### Barrières de confinement proposées:

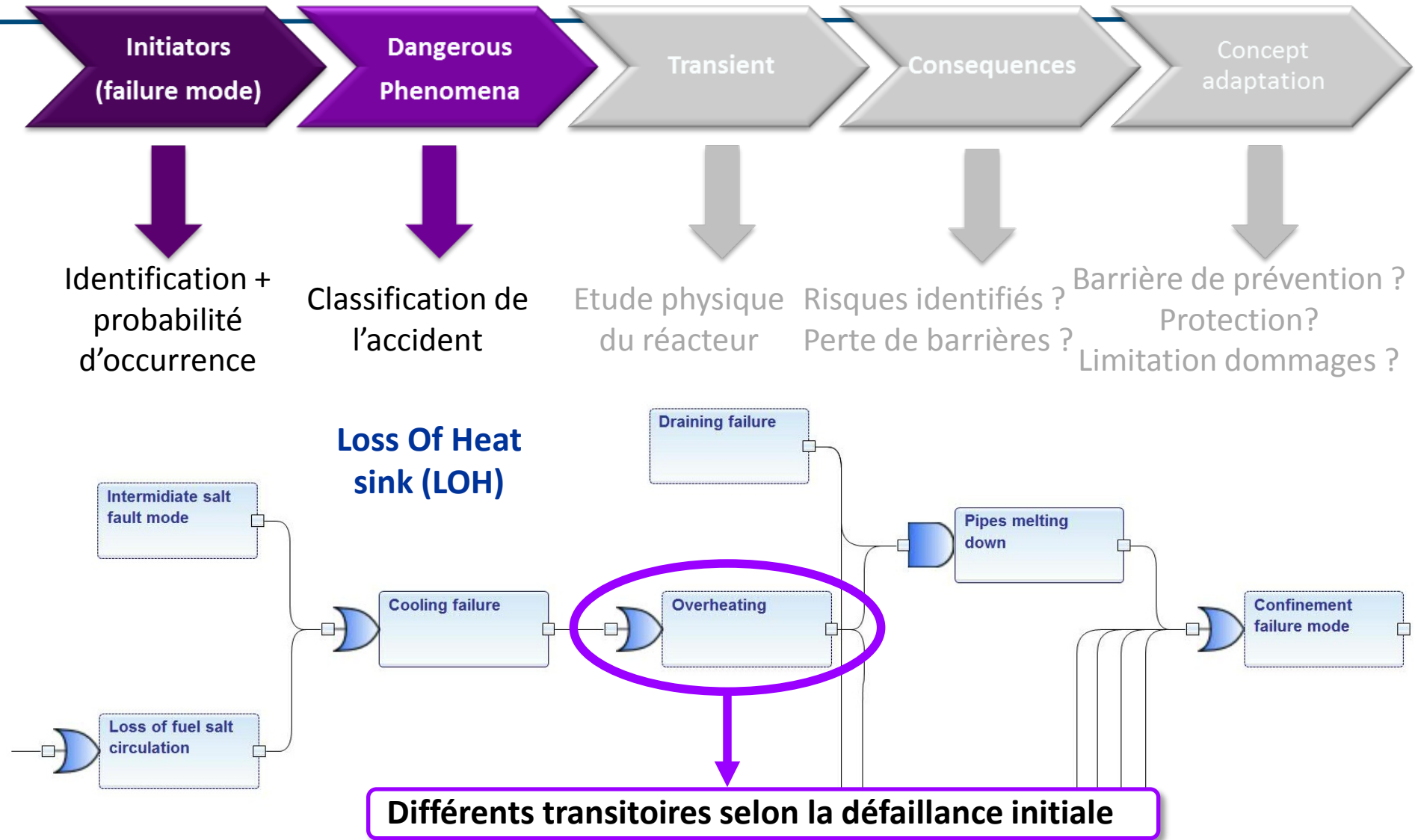
**1ère barrière** : enveloppe combustible, composée de 2 aires : espaces critique et sous-critique

**2ème barrière** : cuve du réacteur, inclus aussi les unités de retraitement et de stockage

**3ème barrière** : paroi du réacteur, correspond au bâtiment réacteur

## MSFR : exemple de scénario accidentel

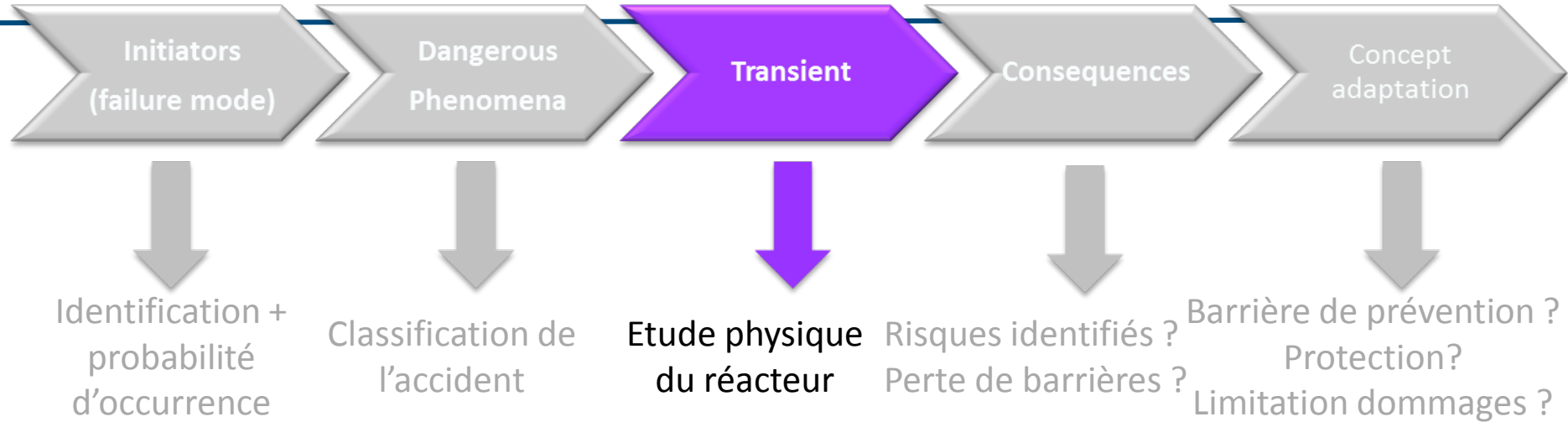
***Thèse de M. Brovchenko – LPSC - 2013***





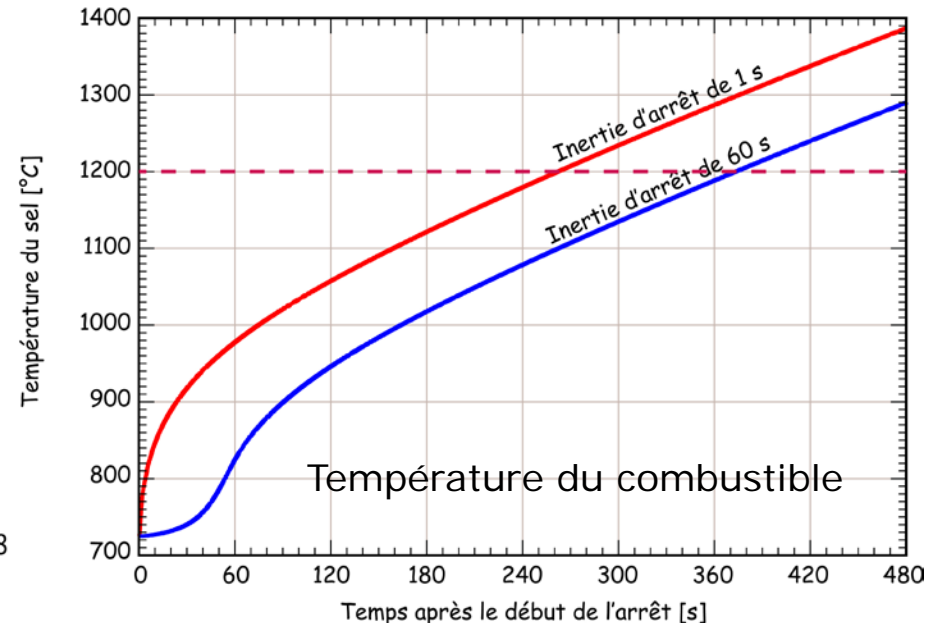
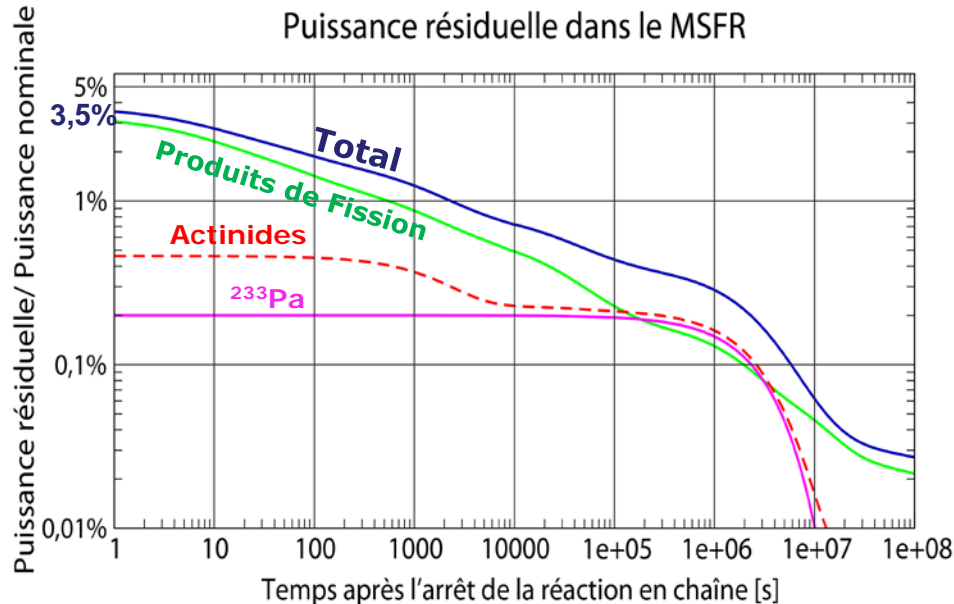
# MSFR : exemple de scénario accidentel

Thèse de M. Brovchenko – LPSC - 2013



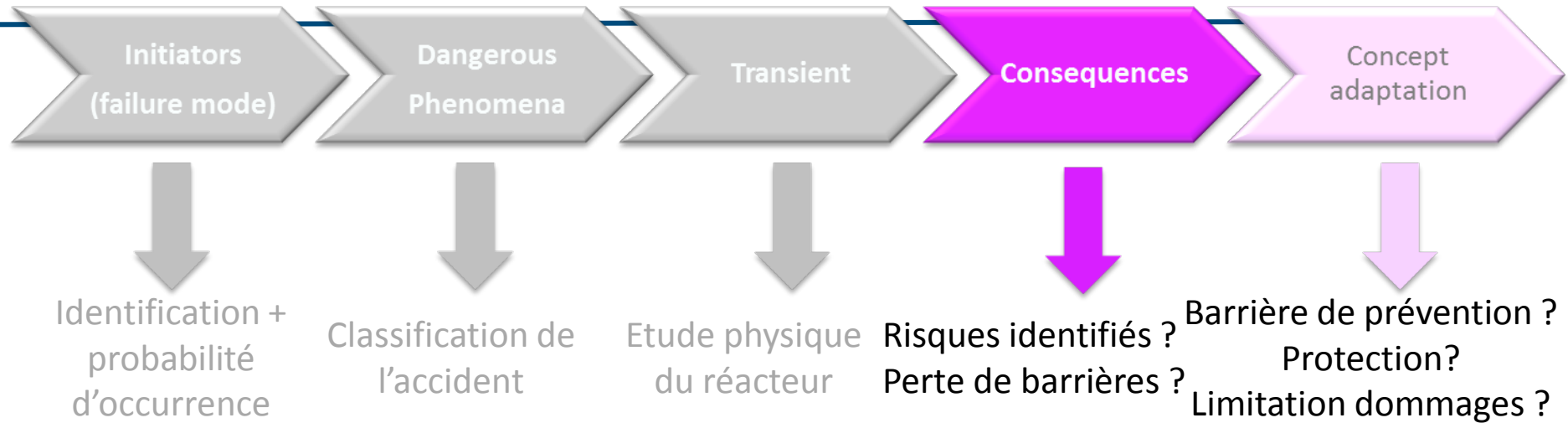
**Scénario = arrêt passif de la réaction en chaîne (coefficients de contre-réaction thermiques) + augmentation de la température combustible due à la puissance résiduelle**

Puissance résiduelle dans le MSFR



# MSFR : exemple de scénario accidentel

Thèse de M. Brovchenko – LPSC - 2013



## Risques identifiés :

- Echauffement continu du à la puissance résiduelle (physique)
- Augmentation de température : impact de l'inertie des pompes (technologique)

## Protection:

- Vidange du sel combustible
- Protection thermique des parois ?

*Approche de 'Design by Safety'*

**Quantitativement :**

**Risque = Probabilité x Gravité**

Quantifier les probabilités d'accident et leur gravité

<b>Del. n°</b>	<b>Pre-Conceptual Design and Safety</b>	<b>Lead beneficiary</b>	<b>Person. months</b>	<b>Delivery date</b>
D2.1	Design parameters definition for most stable salt flux	INOPRO	12	Month 12
D2.2	Optimization of pre-conceptual design with good thermal homogeneity	CNRS	15	Month 24
D2.3	Sensitivity studies of the salt flux in the optimized design	CNRS	8	Month 30
D2.4	Evaluation of irradiation damages of structural material	CNRS	5	Month 36
D2.5	Safety approach of fast liquid fuel system	CNRS	5	Month 30
D2.6	Safety analysis - Transient calculations	KIT-G	13	Month 36
D2.7	Design components for MSFR	CNRS	6	Month 30
D2.8	Energy conversion system for MSFR	EVM	6	Month 36
D2.9	Recommendations for MSFR demonstrator pre-conceptual design	CNRS	11	Month 36

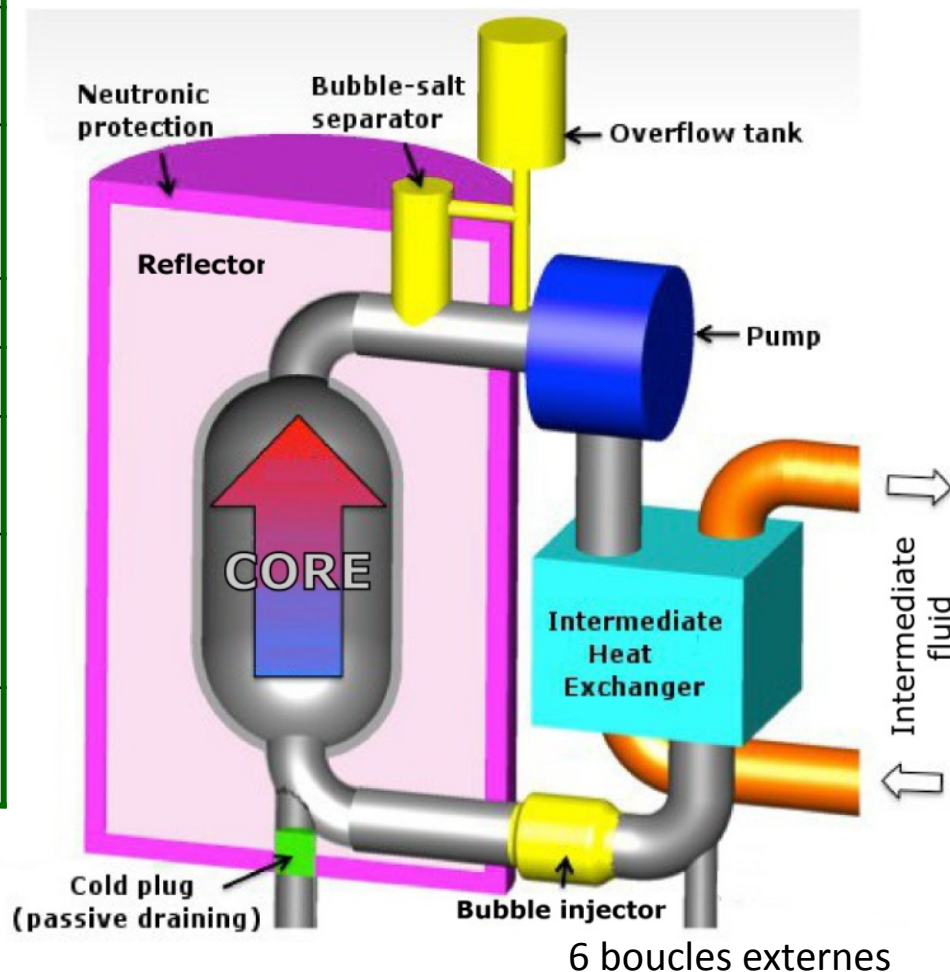


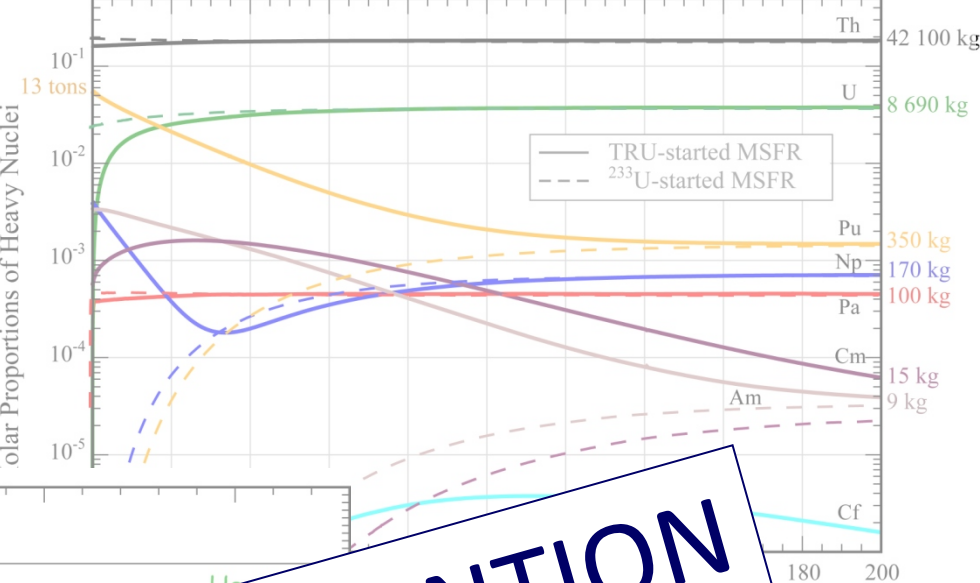
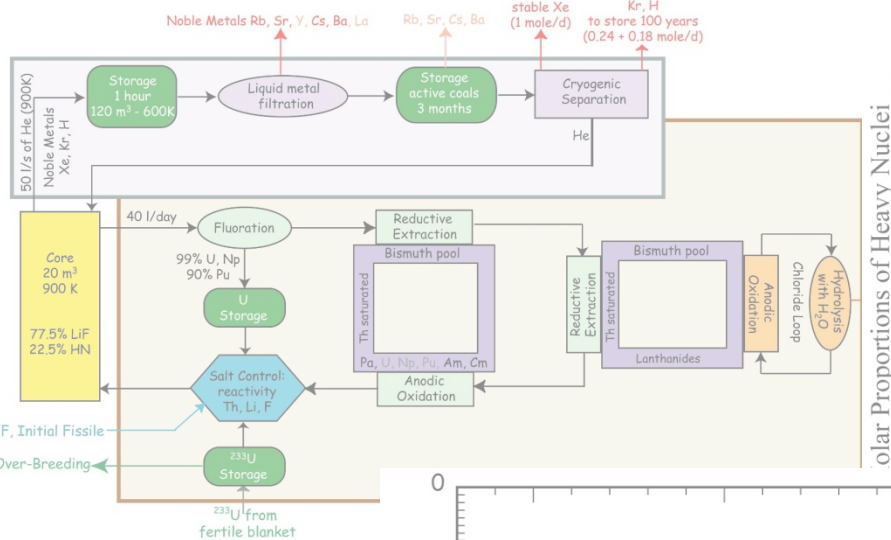
Puissance thermique	100 MWth
Température moyenne du combustible	725 °C
Augmentation de température en cœur	30 °C
Composition initiale du sel combustible	75% LiF-ThF <sub>4</sub> - <sup>233</sup> UF <sub>4</sub> (660 kg d' <sup>233</sup> U) ou LiF-ThF <sub>4</sub> -(enrichiU+MOx-Th)F <sub>3</sub>
Point de fusion du sel	565 °C
Densité du sel	4,1 g/cm <sup>3</sup>
Dimensions du cœur	Diamètre : 1,112 m Hauteur : 1,112 m
Volume de sel total	1,8 m <sup>3</sup> 1,08 en cœur 0,72 en circuits externes
Temps de cycle total du combustible	3,5 s



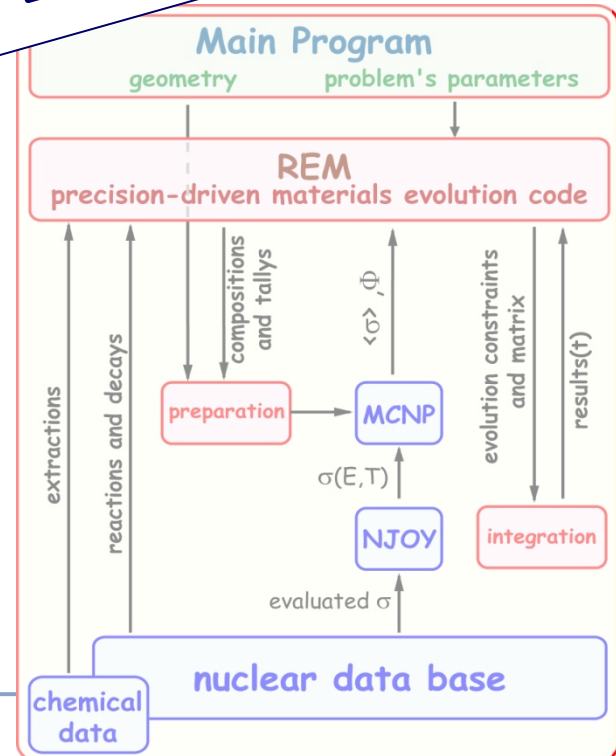
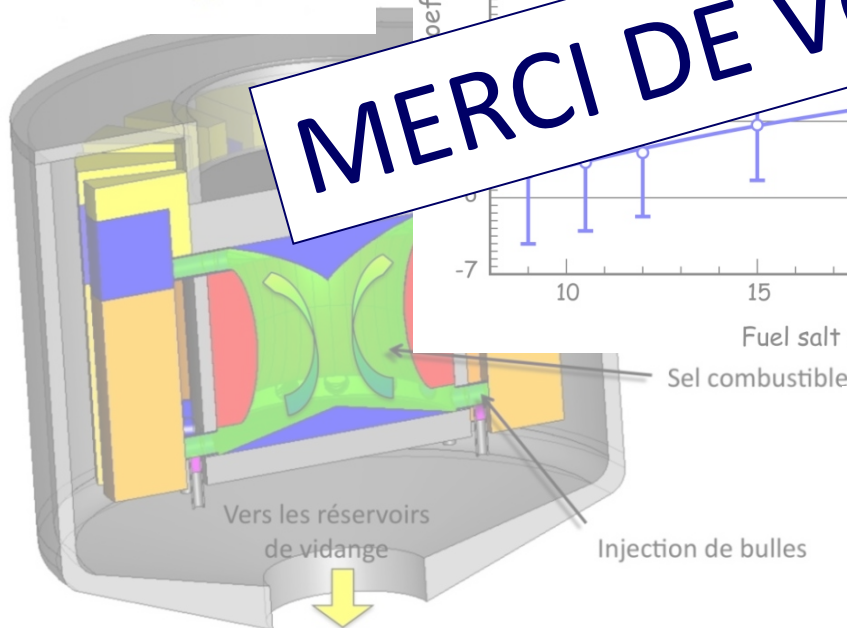
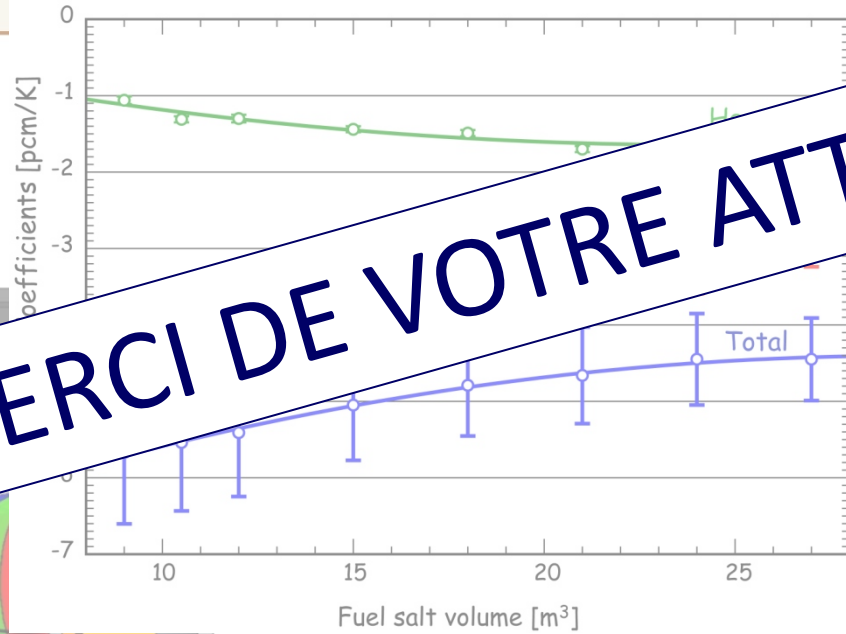
**Caractéristiques du démonstrateur représentatives du MSFR**

**Du réacteur de puissance au démonstrateur :**  
Puissance / 30 et Volume / 10





**MERCI DE VOTRE ATTENTION**



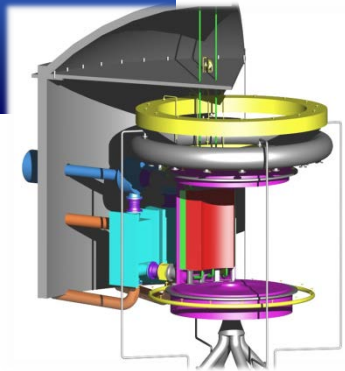


---

# ANNEXES

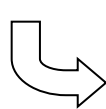


# European 'EVOL' (Evaluation and Viability Of Liquid fuel fast reactor systems) Project (7<sup>th</sup> PCRD) - *EURATOM/ROSATOM cooperation*



**EVOL objective:** to propose a design of MSFR by 2014 given the best system configuration issued from physical, chemical and material studies

- Recommendations for the design of the core and fuel heat exchangers
- Definition of a safety approach dedicated to liquid-fuel reactors - Transposition of the defence in depth principle - Development of dedicated tools for transient simulations of molten salt reactors
- Determination of the salt composition - Determination of Pu solubility in LiF-ThF<sub>4</sub> - Control of salt potential by introducing Th metal
- Evaluation of the reprocessing efficiency (based on experimental data) – FFFER project
- Recommendations for the composition of structural materials around the core



**WP2: Design and Safety**  
**WP3: Fuel Salt Chemistry and Reprocessing**  
**WP4: Structural Materials**

**European participants to EVOL:** France (CNRS: Coordinator, Aubert&Duval, INOPRO, Grenoble INP), EU (JRC – Institute for TransU Elements), Netherlands (Delft University of Technology), Germany (KIT-G, FZD), Italy (Politecnico di Torino), United Kingdom (Oxford University), Czech Republic (Energovyzkum Ltd), Hungary (Budapest University of Technology) + 2 observers (Politecnico di Milano, Italy and Paul Scherrer Institute, Switzerland)

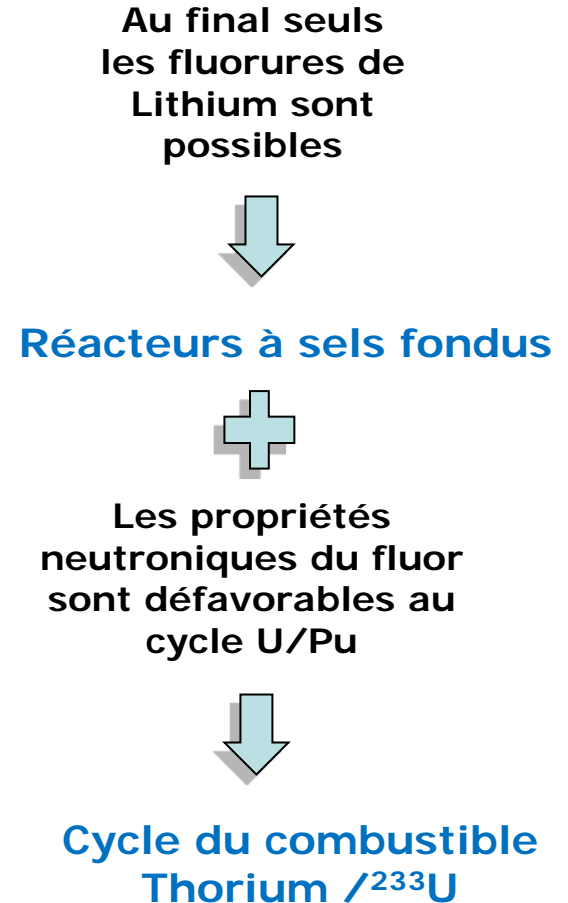
**+ Coupled to the ROSATOM project MARS (Minor Actinides Recycling in Molten Salt)**

---

# Réacteurs à sels fondus : introduction

## Contraintes sur le type de liquide ?

- Température de fusion pas trop élevée
- Température d'ébullition 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



## Avantages d'un combustible liquide

- Irradiation uniforme du combustible (pas de plan de chargement)
- Chaleur déposée directement dans le caloporteur
- Possibilité de reconfigurer le cœur en quelques minutes
  - Une configuration permet d'optimiser la production d'énergie en gérant le risque de criticité
  - Une 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

# Réacteurs à sels fondus : Cadre mondial

---

## Autres concepts de réacteurs à sels fondus étudiés actuellement :

- **Rosatom : MOSART (MOlten Salt Actinide Recycler & Transmuter) - Depuis 1970**  
RSF à spectre épithermique incinérateur d'actinides développé dans le cadre de l'ISTC (International Science and Technology Center)  
Version régénératrice avec ajout de Th en couverture étudiée dans le cadre du projet MARS
- **Chine : TMSR - Depuis 2011**  
Programme de recherche stratégique prioritaire nommé "Advanced Fission Energy Program" de l'académie des Sciences chinoise - 70 millions de dollars et 400 chercheurs du Shanghai Institute of Applied Physics (SINAP)  
D'ici 2017 : démonstrateur de RSF de 2 MWth à spectre thermique (type MSRE américain)  
D'ici 2035 : démonstrateur de réacteur à sels fondus de 100 MWe (type MSFR envisagé)
- **Japon : Concept FUJI-AMSB - Depuis les années 80's**  
RSF à spectre thermique de très faible puissance alimenté avec  $^{233}\text{U}$  produit en ADS  
Développé par l'« International Thorium Energy & Molten-Salt Technology » (IThEMS) + république tchèque  
Démonstrateur 'mini-FUJI' envisagé (recherche de financement de 300 M\$)
- **USA : Réacteurs à haute température refroidis avec un sel fluorure liquide (FHR)**  
Réacteurs haute température à combustibles solides  
R&D commune sur matériaux, technologie, chimie et contrôle de sels fluorures liquides

## Forum International Génération 4 et RSF

**2004** : création du comité de pilotage pour le système Réacteurs à Sels Fondus (MSR-SSC)

**2008** : sélection du MSFR comme concept de référence du système MSR

**2010** : Signature d'un Memorandum Of Understanding par la France et Euratom avec USA et Russie en observateurs

MSR-SSC composé de représentants français (CNRS, CEA présidence) et d'Euratom (ITU, ~~république tchèque et TU Delft~~) + ~~observateurs américains / russes / japonais / chinois~~



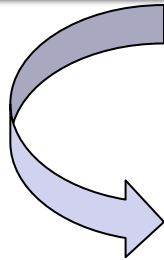
# EVOL : Sélection du sel combustible (livrable 3.7 & milestone 6)



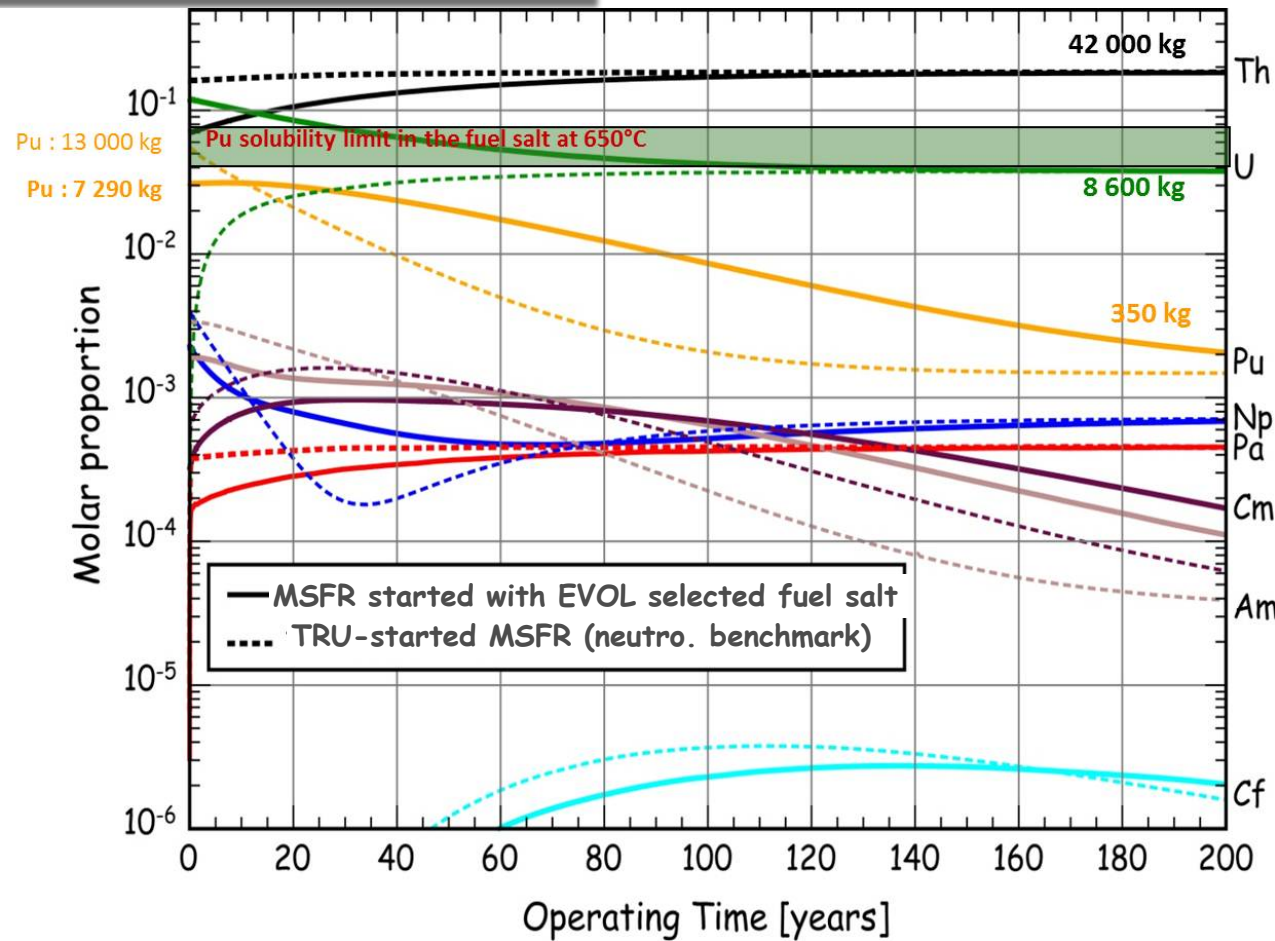
## Composition initiale du combustible optimale :

LiF-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>-(TRU)F<sub>3</sub> avec (77.7-6.7-12.3-3.3 mol%) et  
U enrichi à 13%

$$\text{Densité} = 5085.6 - 0.8198 \cdot (T/K) - T(\text{solid.}) = 867 \text{ K}$$



Comportements  
neutronique, chimique et  
matériaux très satisfaisants



# Molten Salt Fast Reactor – Cadre national (2)

---

## Programme NEEDS (voir présentation de S. David) et MSFR



**2012** : Financement équivalent à celui attribué en 2011 au PCR-ANSF

**2103** : Thématique RSF dans les projets fédérateurs « Systèmes Nucléaires et Scénarios » (physique des réacteurs, sûreté, retraitement, scénarios) et « Matériaux »

## Projet structurant CLEF (Combustible Liquide pour une Énergie Future)

Projet de Grenoble INP - Durée : 3 ans (2013 – 2015) – Budget : 200 k€

5 laboratoires de Grenoble INP, UJF, CNRS (G-Scop, LEPMI, LNCMI, LPSC, SIMAP)

### Objectifs

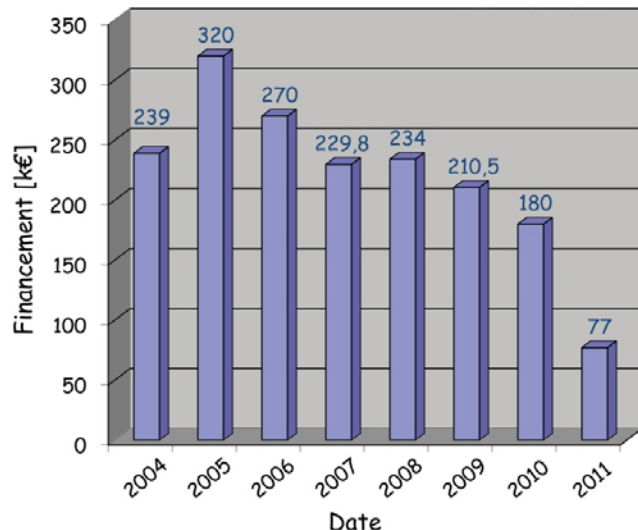
- Développer les outils et modèles numériques nécessaires pour les études de Conception et de Sûreté du MSFR
- Entretenir et développer les compétences dans le domaine des matériaux des réacteurs de Génération IV
- Proposer une nouvelle approche des études de sûreté des réacteurs nucléaires adaptée au cas d'un combustible liquide

# Molten Salt Fast Reactor – Cadre national (1)

## PCR-ANSF de PACEN (Applications au Nucléaire des Sels Fondus) –2004 à 2011

Des actions menées par  
9 laboratoires appartenant à  
5 instituts du CNRS  
(IN2P3, INC, INEE, INP, INSIS)

15 hommes.mois /an - Budget moyen de  
220 k€ réparti sur 5 thèmes de recherche  
pendant 8 ans



### Technologies des sels fondus

- Pyrochimie par brassage électromagnétique
- Etude du bullage de gaz dans les sels fondus
- Boucle de sels fondus en circulation forcée (FFFER)
- Préparation de sels et fluoration

### Chimie des sels fondus

- Extraction électrolytique des lanthanides en milieu fluorure
- Comportement des lanthanides (Nd, Gd, Sm, Eu, Er) dans les mélanges de sels fondus LiF-ThF<sub>4</sub> et LiF-NaF-ThF<sub>4</sub>
- Etude thermodynamique par Spectrométrie de Masse à Haute Température pour les RSF du Cycle Th/U

### Simulations neutronique et thermo-hydraulique

- Simulations neutroniques concernant le MSFR
- Simulations de la thermo-hydraulique du MSFR (INOPRO)
- Design du MSFR (A3I)

### Etudes des matériaux

- Tenue mécanique et corrosion

### Structure des sels fondus

- Structure des sels fondus fluorés pour les RSF: approche par RMN et EXAFS à haute température du système LiF-CaF<sub>2</sub>-ZrF<sub>4</sub>-ThF<sub>4</sub>
- Simulations ab-initio et par dynamique moléculaire de sels fondus fluorés

### Mesures de données neutroniques

- Mesure simultanée des sections efficaces de capture et de fission de <sup>233</sup>U dans le domaine des résonances

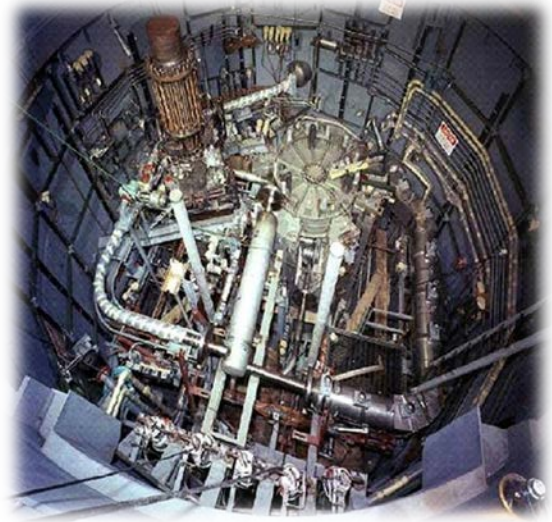
## GNR GEDEPEON (Gestion des Déchets et Production d'Énergie par des options nouvelles) de PACEN

Environ 20 keuros par an de soutien à la R&D sur les réacteurs à sels fondus  
(chimie, matériaux, sûreté)

# Bref historique de la R&D RSF

## Les projets de l'ORNL (Oak-Ridge National Labora

- ❑ 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 70
- ❑ 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

# MSFR : Conclusions et Perspectives

---

**Bilan :** définition d'une configuration de référence d'un réacteur à sels fondus en spectre rapide, basée initialement sur des études neutroniques puis incluant des aspects système (retraitement, design, thermohydraulique, matériaux, sûreté)

## Perspectives

### ⇒ Cadre

- Projet européen EVOL (7<sup>ème</sup> PCRD) – Collaboration avec Rosatom
- Programme NEEDS via les projets fédérateurs Systèmes Nucléaires et Matériaux – Collaborations avec l'IRSN et EdF
- Projet structurant de Grenoble INP
- Autres collaborations à l'international (Chine, Japon, USA) ?

### ⇒ Optimisation du système et études de sûreté/design

- Design du réacteur et de la vidange (incluant les matériaux, les composants...)
  - Analyses de risques – Définition d'une approche de sûreté dédiée
  - Couplage neutronique-thermohydraulique : design du cœur et transitoires
  - Couplage multi-physique et multi-échelle pour une simulation globale
  - Etudes physico-chimiques
-

# MSFR : Exemples de résultats

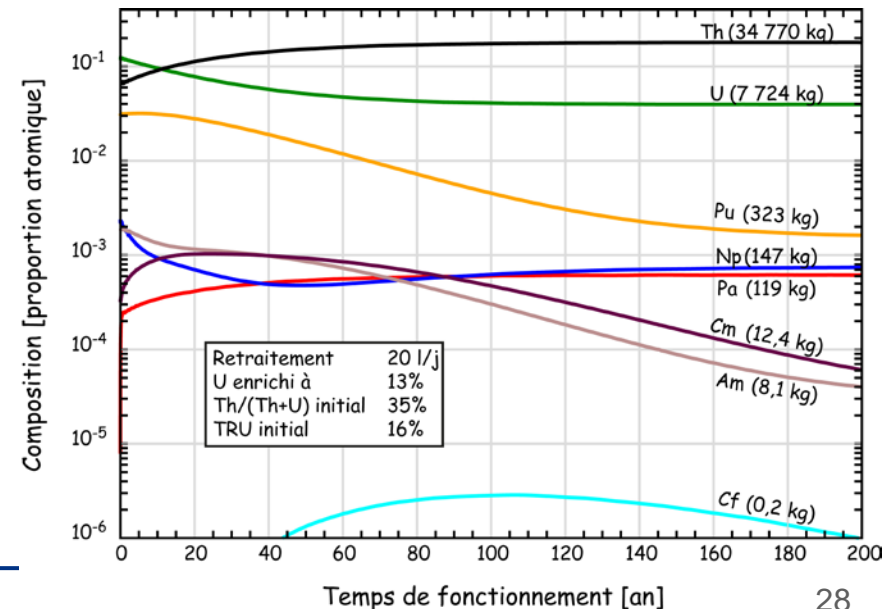
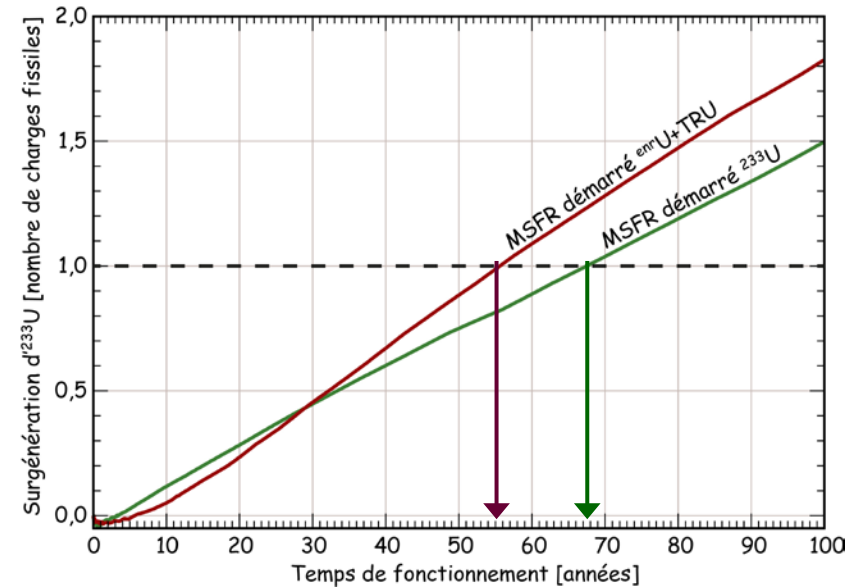
## Combustible du premier démarrage

Réacteurs régénérateurs (4<sup>ème</sup> génération) :  
chargement fissile nécessaire une seule fois  
au démarrage



## Quel premier chargement fissile pour un MSFR ?

- De l' $^{233}\text{U}$  : n'existe pas dans la nature – A produire dans d'autres réacteurs (génération 3 ou 4) par exemple
- Des transuraniens (TRU) des réacteurs à eau : limite de solubilité de ces éléments dans le sel
- De l'uranium enrichi : enrichissement de 25% non autorisé (prolifération)
- Un mix de ces options :
  - Uranium enrichi à 13% + les TRU des réacteurs actuels
  - $^{233}\text{U}$  + les TRU produits dans les réacteurs à eau
  - MOx thorié sortant des réacteurs à eau





# MSFR : Exemples de résultats

## Rôle du retraitement

Le retraitement sert traditionnellement à extraire les noyaux neutrophages produits par les fissions du combustible : plus le retraitement est lent, plus ces noyaux s'accumulent et empoisonnent le réacteur

Combustible liquide = permet de retraiter sans arrêt du réacteur

- **Retraitement chimique journalier hors cœur :**
  - Il n'est pas utile de retraiter plus de 100 l/j
  - En dessous de 10 l/j on perd la régénération
- **Efficacité du bullage :** aucune influence sur les propriétés neutroniques du réacteur

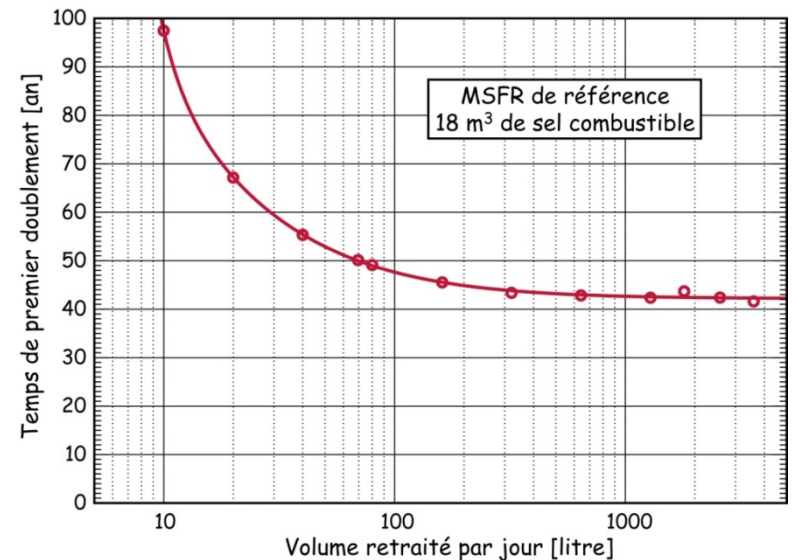


Le vrai rôle du retraitement est de maintenir les propriétés physico-chimique du sel

- Contrôler la corrosion
- Éviter les dépôts d'éléments non solubles
- Limiter l'abrasion et l'érosion des matériaux de structure



**Impact très faible des retraitements sur le fonctionnement neutronique du réacteur grâce au spectre rapide = étude possible des 2 aspects en parallèle**





# MSFR : Exemples d'études en cours

## Analyse de sûreté du MSFR : scénario accidentel

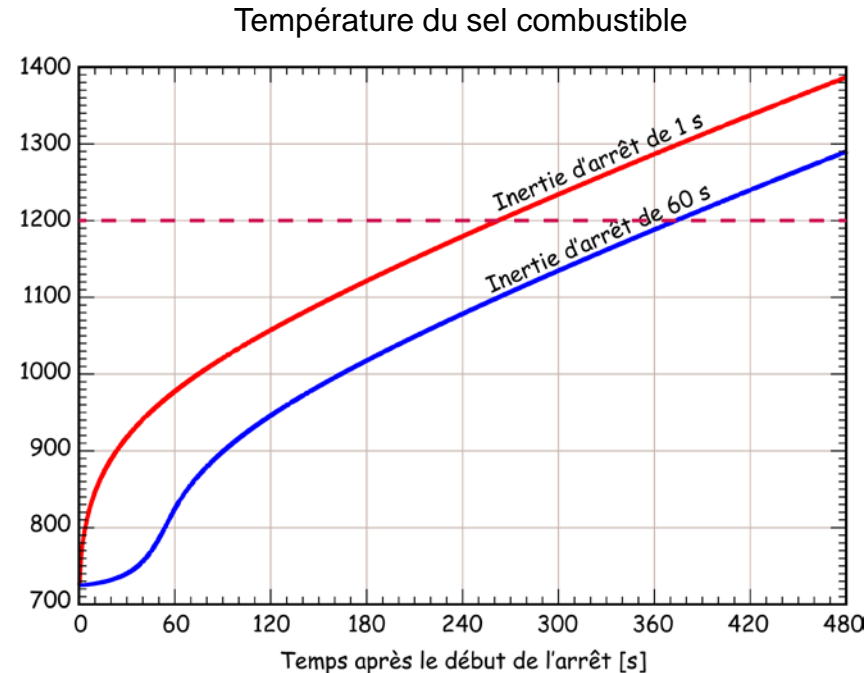
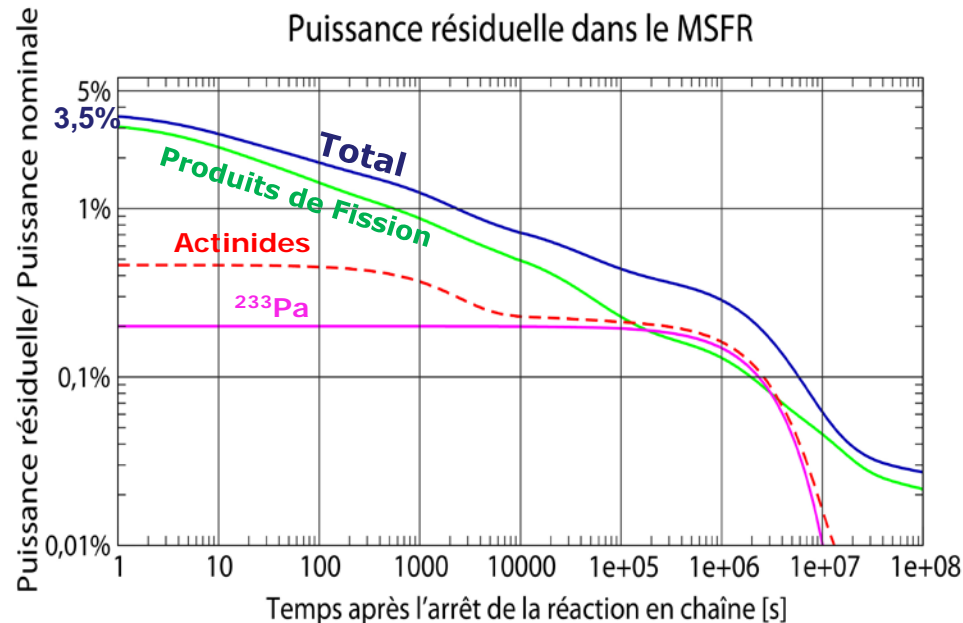
### Caractéristiques de sûreté très différentes des réacteurs à combustible solide

Nécessité de redéfinir complètement l'approche de sûreté du réacteur et les analyses de risque du système – Utiliser l'approche de « Safety by Design »

Perte totale de refroidissement = arrêt passif de la réaction en chaîne (contre-réactions)  
+ augmentation rapide de la température du sel combustible

- Il faut déterminer le temps disponible pour vidanger avant détérioration des matériaux de structure
- Ce temps dépend de phénomènes physiques et de l'inertie du système de refroidissement

*(Thèse en cours)*



# MSFR : Résultats et études en cours

## Configuration MSFR de référence

Sel initial : 77,5%  $^7\text{LiF}$  + 22,5% (Th+fissile) $\text{F}_4$   
Température de fonctionnement : 625 à 775 °C  
Puissance : 3 GW<sub>th</sub> (1,4 GW<sub>él</sub>)

Inventaire initial d' $^{233}\text{U}$  par GW<sub>él</sub> : 3600 kg  
Alimentation en Th par GW<sub>él</sub> : 1100 kg par an

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

Volume de sel combustible : 18 m<sup>3</sup>

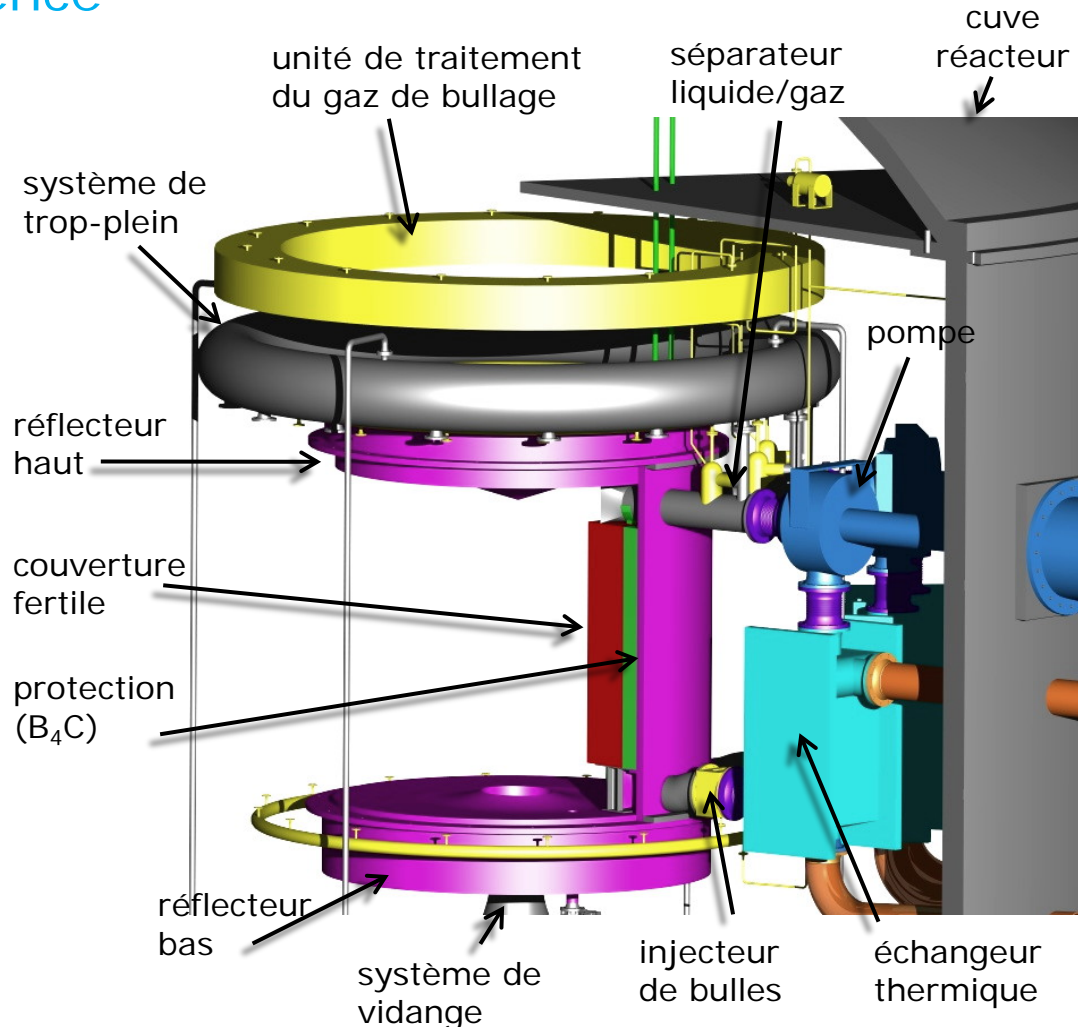
- 1/2 dans le cœur
- 1/2 dans les échangeurs et tuyaux

Puissance volumique : 330 W/cm<sup>3</sup>

Coefficient de contre réaction:  $\text{de} \approx -5 \text{ pcm/K}$

Retraitement du cœur : 10 à 40 l/j

Production d' $^{233}\text{U}$  : 52 à 90 kg/an  
Temps de doublement : 98 à 56 ans



*Vue conceptuelle des éléments du MSFR – Non représentative d'un réacteur au stade de la conception mécanique*

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

- Une fluoruration 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 réductive permet de séparer les autres transuraniens

- Ils seront, eux aussi, rapidement réinjectés dans le cœur

- Une deuxième extraction réductive permet de séparer les lanthanides

- Ils seront rejetés sous forme d'oxyde

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

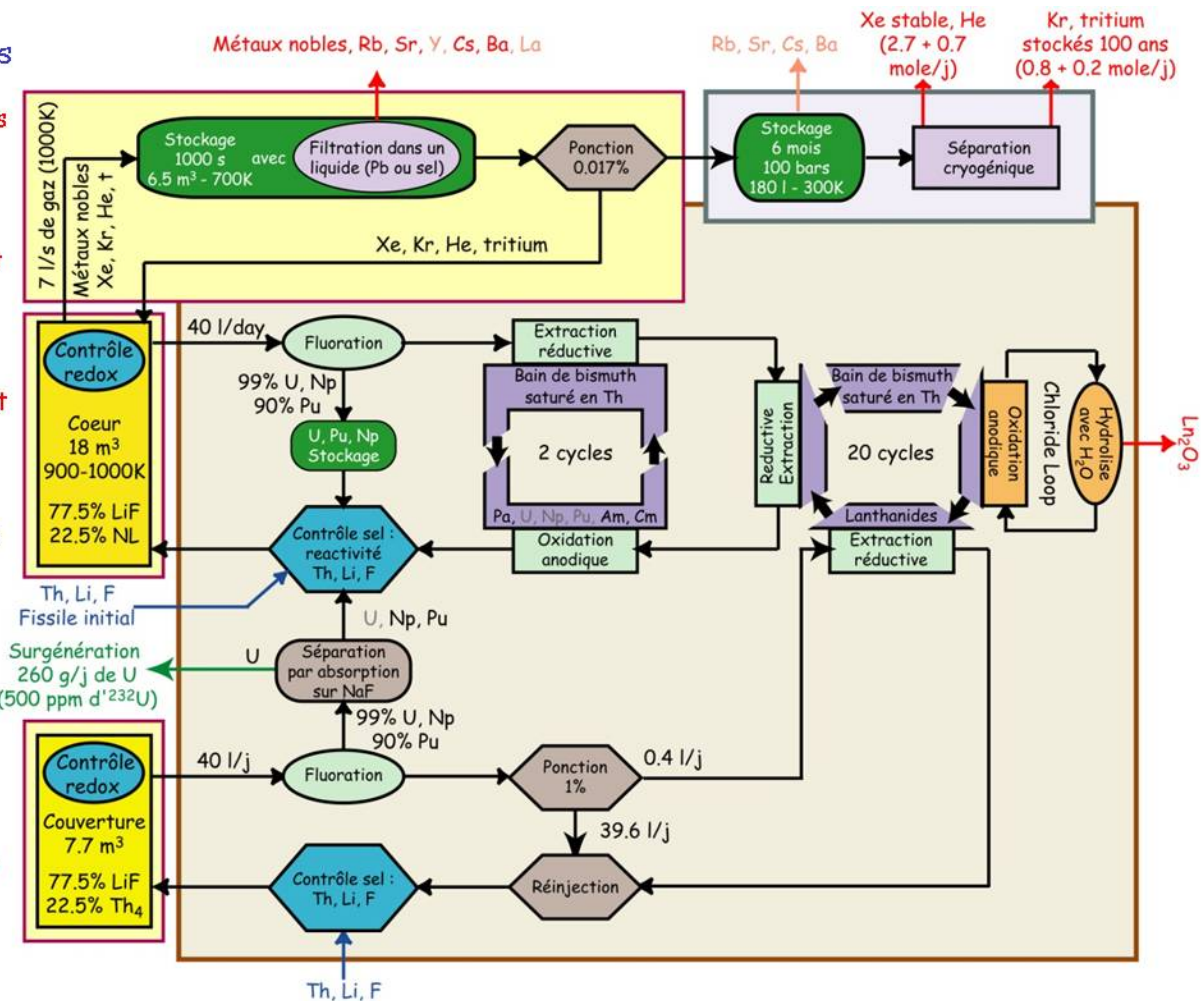
- Une fluoruration permet de séparer les U, Np et Pu

- Np et Pu sont réinjecté 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 d'hélium dans le cœur et probablement 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 une heure 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

# Projet structurant CLEF de Grenoble INP

---

Développement d'un modèle CFD de la cavité cœur du MSFR sans couplage

Modélisation multi-physique du MSFR

Étude sur la faisabilité d'une technique de séparation de phases à partir d'un calcul simple de forces MHD sur une inclusion isolée

Proposition de différents matériaux candidats pour les échangeurs de chaleur du MSFR

Proposition d'essai de vérification expérimentale en conditions pertinentes pour les échangeurs du MSFR et amorce des essais.

Caractérisation de la vaporisation de fluorures tel que le  $\text{ZrF}_4$  et de la solubilité des fluorures de valence 3 (Plutonium ou Terres Rares). Étude thermodynamique du mélange  $\text{ZrF}_4$ -LiF

Gestion des taux d'oxygène des bains de sels fluorés par des techniques applicables in-situ

Mise en œuvre de l'approche floue pour la gestion des probabilités

Étude préliminaire des risques et recommandations pour les études d'accidents du MSFR

Amélioration de la modélisation des transferts thermiques dans le sel en situation accidentelle

---

# Molten Salt Fast Reactor : Cadre européen

## Projet européen "EVOL"

### Evaluation and Viability Of Liquid fuel fast reactor

7<sup>ème</sup> PCRD (2011-2013 – 1 M€) : coopération Euratom/Rosatom

#### Objectifs :

Proposer la meilleure configuration de design du MSFR, et donner des pistes pour la définition d'un démonstrateur



- WP2: Pre-Conceptual Design and Safety
- WP3: Fuel Salt Chemistry and Reprocessing
- WP4: Structural Materials

**12 partenaires européens dont** France (CNRS: Coordinateur, Grenoble INP , INOPRO, Aubert&Duval), Pays-Bas (Université Techno. de Delft), Allemagne (ITU, KIT-G, HZDR), Italie (Ecole polytechnique de Turin), Angleterre (Oxford), Hongrie (Univ Techno de Budapest)  
**+ 2 observateurs depuis 2012** : Politecnico di Milano et Paul Scherrer Institute

**+ Couplé au projet MARS (Minor Actinides Recycling in Molten Salt) de ROSATOM (2011-2013 – 1M€)**

Partenaires : RIAR (Dimitrovgrad), KI (Moscow), VNIITF (Snezinsk), IHTe (Ekateriburg), VNIKHT (Moscow) et MUCATEX (Moscow)

