

## **CEA R&D on Molten Salt Reactors**

J-Claude Garnier,

Gen IV reactors Program Manager,

CEA/DES/DPE

M-Sophie Chenaud,

R&D MSR Project Manager,

CEA/DES/IRESNE/DER

# Why a study program on MSR at the CEA and now ?

MSR have very interesting *potential* advantages in the French context

1. In "fast neutrons" configuration, the reactor is adapted for the fuel cycle closure: use of depleted U, Pu multi recycling, **minor actinides transmutation**, etc.
2. Intrinsic safety (no energetical accident)
3. Controllable power generation, complementary to intermittent renewable energies (flexibility)
4. A visible innovation in the nuclear landscape ->attractiveness for young graduates

**BUT many obstacles to overcome:**

materials, corrosion, chemistry, operation, licensing, technologies, reprocessing, maintenance, etc.

In the global race for innovation, MSR  
can be seen as a “game changer”

Accelerate R&D on scientific challenges

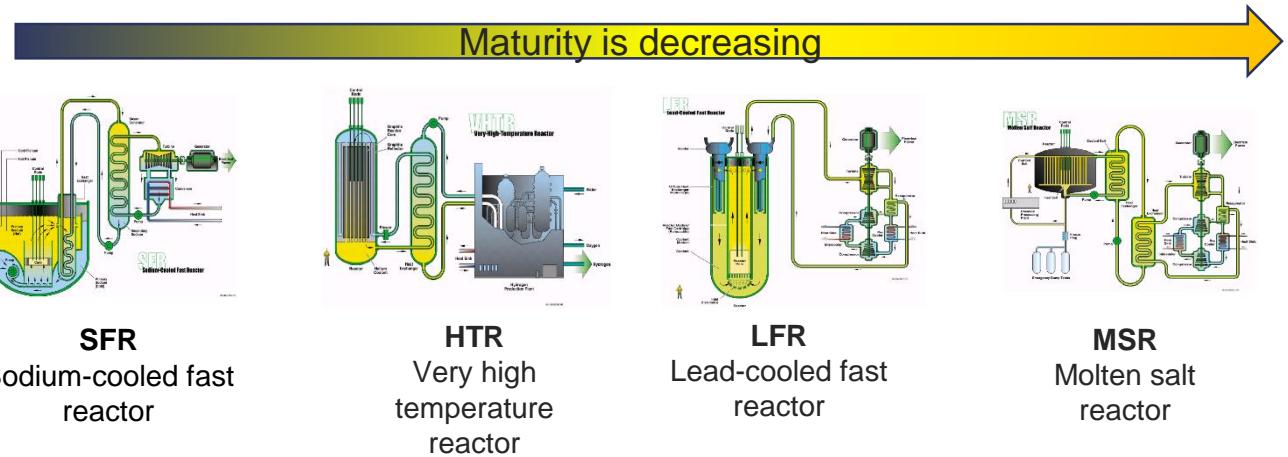
To answer the question as quickly as possible: does it work or not?

The CEA mission is R&D ->**develop and capitalize scientific knowledge** (from our own funding) and also take part in **technological developments** (in collaboration with industrial partners)



# Technological maturity : a scale from 1 to 9 to place different technologies

NMT	Catégorie	Définition	Commentaire
1	Démonstration du concept	Concept de la technologie présentée de façon succincte dans la littérature, sans que l'application de la technologie soit clairement établie	Correspond à une nouvelle innovation, sans application spécifique
2		Concept détaillé en relation avec l'application visée. Des documents techniques indiquent l'utilisation possible de cette technologie, tout en identifiant les problèmes éventuels pour atteindre les performances visées	Description d'une innovation pour une application donnée, sans que l'applicabilité ne soit démontrée
3		Démonstration du concept sur la base de vérifications analytiques et d'essais élémentaires en laboratoire qui visent à mieux appréhender les points critiques de la technologie compte tenu des performances visées. La faisabilité technique (notamment fabrilité) a fait l'objet d'évaluations préliminaires, le cas échéant en concertation avec des fournisseurs	Les vérifications ou essais se font à ce stade sur des éléments séparés de la technologie
4	Démonstration de la technologie (niveau composant)	Technologie ou composant testé sur la base d'une maquette à échelle réduite visant à démontrer le caractère fonctionnel et fournir des premiers éléments de faisabilité technique. Les conditions d'essais sont simplifiées. Les analyses sont disponibles, sur la base de conditions de fonctionnement enveloppes, non nécessairement exhaustives	Parties de composants sont testées sous des conditions enveloppes. Plusieurs maquettes peuvent être nécessaires pour couvrir des problèmes spécifiques (eg analyses de performance thermiques, sollicitations thermomécaniques pour couvrir un mode de ruine spécifique,...)
5		Technologie ou composant testé sur la base d'une maquette représentative. Les procédés de fabrication sont représentatifs de ceux utilisés sur le composant final. Les conditions d'essais sont simplifiées. Les analyses sont disponibles, sur la base de conditions de fonctionnement détaillées, mais non nécessairement exhaustive.	Maquette représentative mais à échelle réduite. Les essais peuvent être réalisés dans des conditions d'environnement différentes de celles de l'environnement visé.
6		Technologie ou composant testé sur la base d'une maquette représentative. Les conditions d'essais sont également représentatives. Les analyses sont disponibles, sur la base de conditions de fonctionnement détaillées	Maquette représentative, à échelle réduite, dans des conditions de fonctionnement représentatives
7	Démonstration des performances	Composant ou système qualifié sur la base d'essais sur boucle de grande puissance en conditions d'environnement et de sollicitations représentatives. La fabrilité est démontrée. Les analyses (fonctionnement, thermohydrauliques, mécaniques,...) montrent un bon comportement pour l'ensemble des situations de dimensionnement. Le composant ou système est prêt pour les essais de démarrage d'un prototype de réacteur	Maquette de grande dimension dont les parties critiques sont à priori à l'échelle 1. Il n'y a plus à ce stade de doute quant à la fabrilité de ce composant ou système. Les conditions d'essais sont représentatives (même environnement, température, ...).
8		Composant ou système ayant fonctionné sur un prototype de réacteur	Ce cas presuppose que la technologie a déjà été testée dans un prototype de réacteur et que le dimensionnement du composant ou du système est très proche de celui du composant en réacteur et que les conditions de fonctionnement ne sont pas dégradées par rapport à celles du réacteur
9		Application industrielle démontrée sur plusieurs réacteurs, les composants ou systèmes ayant fonctionné plusieurs années sous des conditions de sollicitations analogues	Correspond au cas où un composant ou un système est en parfaite adéquation avec l'état de l'art et est couramment utilisé pour des applications industrielles



## MSR +fast spectrum

- The today's maturity is very low - no reactor has ever been built/operated; no reactor project has applied for licensing by French Safety Authority or equivalent body
- The rise in TRL (Technology Readiness Level) should be supported and demonstrated by multiple experimental achievements (both for reactor and fuel)



# The road already travelled : an important question has been addressed ->the choice of salt

The choice of salt depends on the objectives !

Fluoride salts are often chosen

- Feedback from MSRE
- FHR (molten salt-cooled TRISO solid fuel)
- Thermal spectrum + Th/U cycle

French context of cycle closure

- Investigations around the ability of MSR to work with various Pu and minor actinides

**Chloride salts are preferred  
NaCl-PuCl<sub>3</sub> base**



Fast spectrum

To optimize the conversion of actinides and minimize the production of minor actinides  
Eliminates elements of low mass number, neutron moderators (Li, Be, F)

Treatment processes

Chloride salts are soluble in water >> compatibility with hydrometallurgical used fuel treatment in La Hague Plant

Sufficient solubility of actinides

Low solubility of Pu in fluorides

Salt elements behaviour under neutron flux

Need to enrich with <sup>37</sup>Cl to limit the formation of <sup>36</sup>Cl\* and eliminate K (<sup>36</sup>Cl\*, <sup>40</sup>K\*) and Ca (<sup>41</sup>Ca\*)

Low fusion temperature

But : no realization of MSR neither with chlorides, nor in fast spectrum, nor with Pu nor with reprocessing >> we are here in a disruptive innovation

# ISAC Project, a R&D partnership funded by France 2030

ISAC (Innovative System for Actinides Conversion)



Objectives of the ISAC project :

Study the feasibility of a MSR for actinides conversion

Assess the final impact on the inventory and the type of waste to be stored

Federate the French nuclear sector around this technical objective

Launched in January 2022 -> December 2026

Sketch study (evaluation of design options, performance of the concept, operation and safety analysis)

First small-scale experiments in the main challenging domains : salt chemistry, treatment/recycling, corrosion prevention  
Concept maturity: TRL 2 to TRL 3

Systemic approach : the reactor + the fuel + a use scenario (cycle closure)

Salt : NaCl-MgCl<sub>2</sub>-PuCl<sub>3</sub>-AmCl<sub>3</sub>

5 partners, each partner contributing by their expertise on the different subjects



coordinator



# ISAC for CEA: the creation of new experimental means

**SACLAY** : Corrosion materials, simulation



cea

**MARCOULE** Actinides chemistry,  
cycle processes, ATALANTE



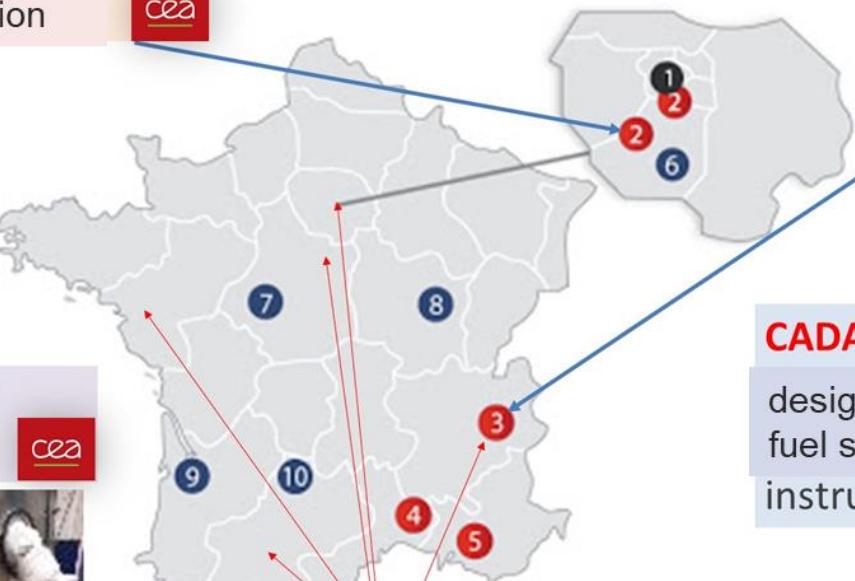
cea

**GRENOBLE** : Salts for  
solar industry or  
thermal storage

cea

**CADARACHE** : Neutronics,  
design, technology,  
fuel simulation,  
instrumentation

cea



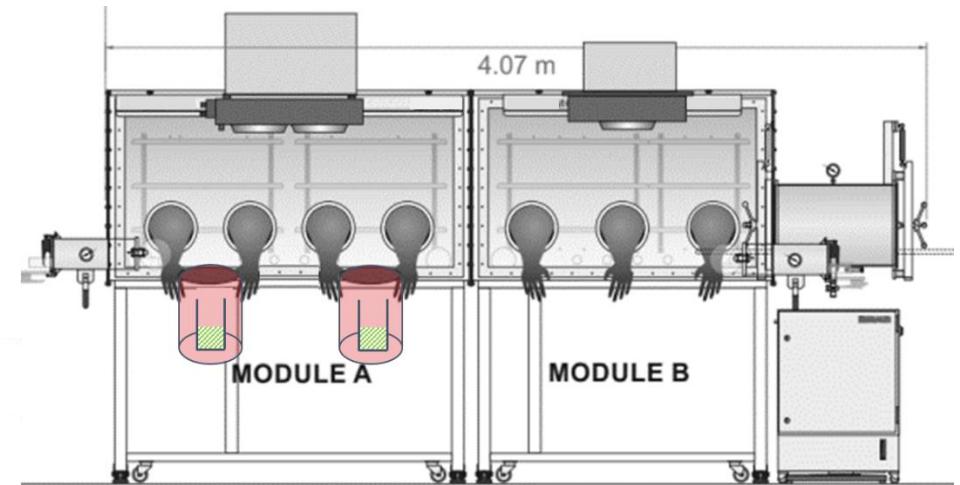
Experimental facilities	Where ?	Expectation by the end of 2026
MESCAL (New)	CEA Saclay	4 glove boxes for corrosion studies / materials screening
BACCHUS (New)	CEA Cadarache	4 small loops (few litres) - Chemistry/processes
JANNUS	CEA Saclay	Irradiation/corrosion - 4MeV Protons beam + salt crucible
MERARG	LECA/STAR / Cadarache	Property measurement – chloride salt with Pu, Am
G1 + L8 Atalante	ATALANTE / Marcoule	Actinides chemistry

## MESCAL, Saclay : corrosion tests

Mescal Ext



Mescal 1&2



Glove boxes for corrosion studies / materials screening  
In the future : MESCAL Dyn and MESCAL Thermo (thermodynamics data)

# BACCHUS loops, Cadarache : corrosion tests – technology – production of NaCl, MgCl<sub>2</sub>, CeCl<sub>3</sub>

## Objectives

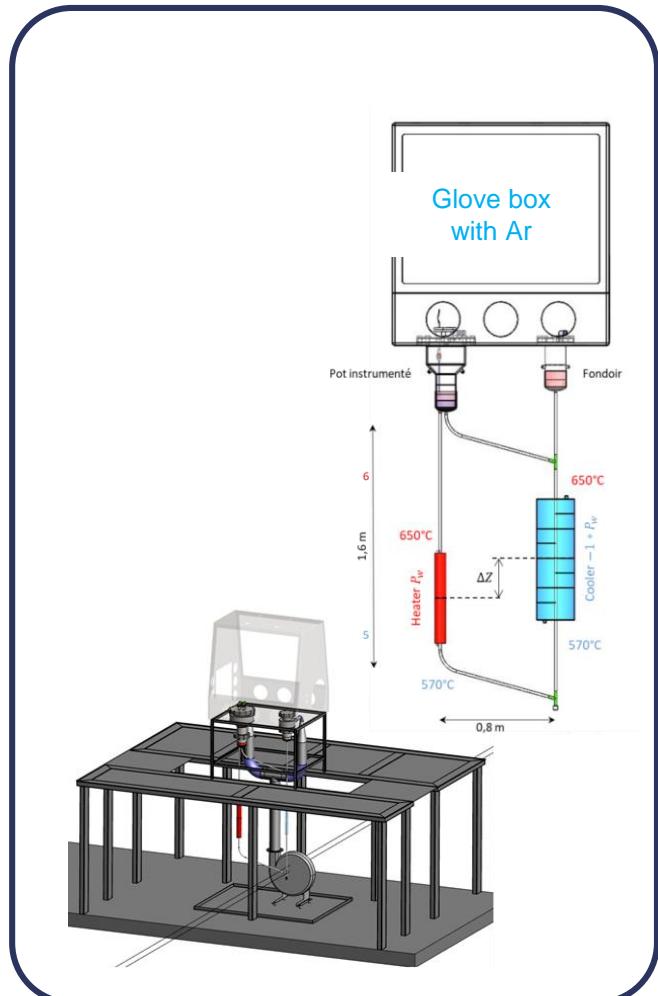
- Small loops for control of chemistry and corrosion study
- Input data for mass transfer simulation code (OSCAR-MSR)

## Approach

- Corrosion studies in an non-isothermal and multi-materials circuit
- boucle = échantillon, interprétation par code OSCAR, rebouclage avec modèles de base
- Study of noble metal trapping and chloride volatilization
  - ✓ Seeding, filtration, bubbling
- Study of salt evolution (precipitation) in case of deviation from operating conditions
  - ✓ Air or water inlet, bad control of redox potential...

**4 successives loops with different materials and salts**

BACCHUS 1



## JANNUS, Saclay : irradiation/corrosion tests

In the MSR, some materials (especially reflectors, internal components, exchangers, etc.) will be **simultaneously subjected to irradiation by fast neutrons and corrosion by molten chloride salts at 550-650°C..**

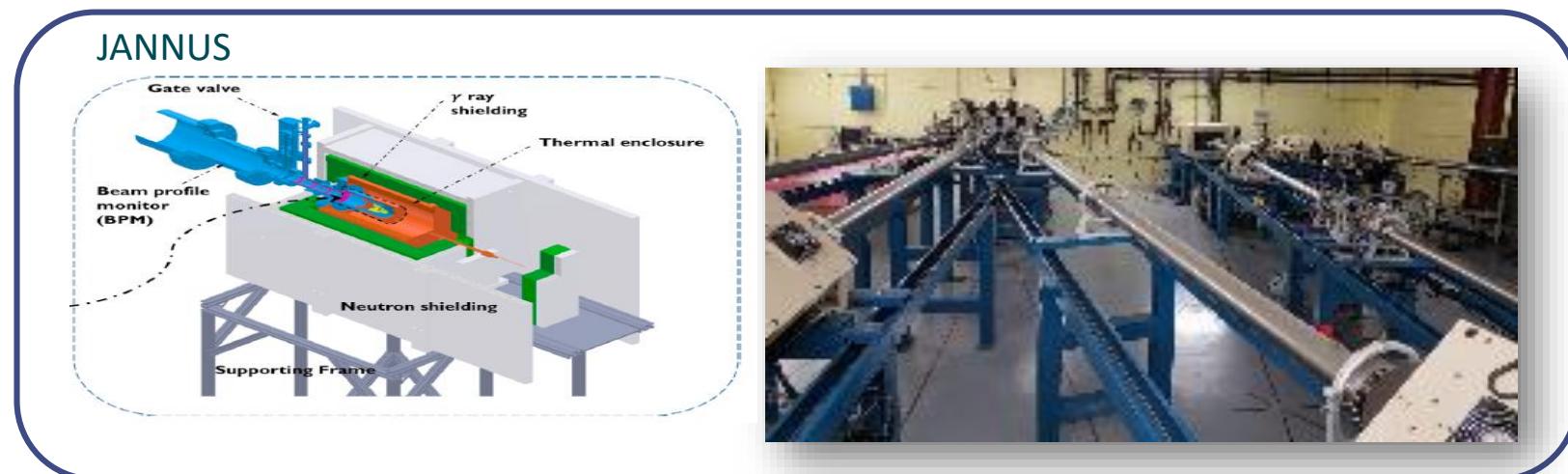
The joint effect of irradiation and corrosion is poorly documented. **Subject of real controversy**

### JANNUS : Irradiations with protons (4 MeV protons beam), irradiation and corrosion combined effects studies

Molten chloride irradiation device

Sample taken from the material to be studied (solid, coating, metal, ceramic, etc.) and thinned to 40µm

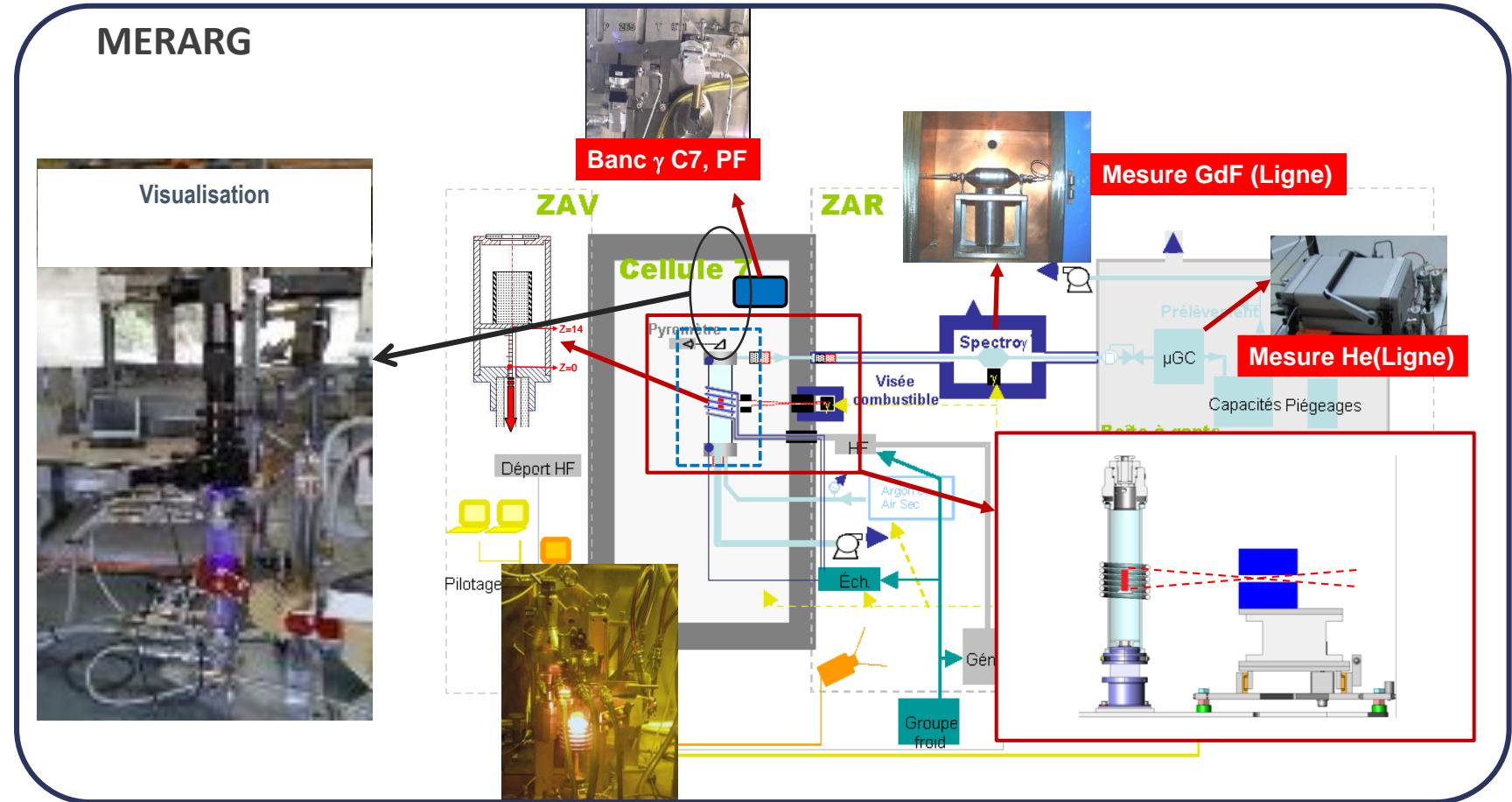
Capsule of inert material filled with corrosive medium connected to the beam line



Analytical experiments to prepare future irradiations

## MERARG, Cadarache, complex salt properties

- ▶ Measurement of melting points according to salt composition
- ▶ Behaviour of fission products and actinides as a function of temperature (release rate)
- ▶ Evolution of salt composition (temperature)



- ▶ Heating of fuels ( $T_{max.} \sim 2600^\circ\text{C}$ ) and measure the release of gases and fission products
- ▶ Measurement of the surface temperature (spectroscopy) and the evolution of the sample microstructure (camera)
- ▶ Collection of emitted aerosols (Filters)
- ▶ Pre and post test examinations of samples (microanalysis laboratory – Metallography, SEM,  $\mu$ -probe, SIMS, XRD, ...)



# ATALANTE, Marcoule : synthesis of actinide chlorides, cycle studies, chemistry and electrochemistry studies of molten salts with actinides

## G1 – ZIP Chimène

Pyrochemistry on **non radioactive** materials :

- Glove boxes under Ar
- Furnaces, TGA-TGA, Potentiostats



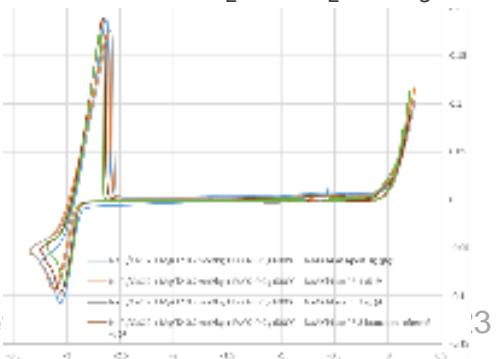
## ATALANTE – L8

Pyrochemistry on **radioactive** materials :

- Furnaces, Potentiostats
- Glove boxes with HCl/Cl<sub>2</sub> input,
- Glove boxes under N<sub>2</sub>
- Spectrometer  $\alpha$ , spectrophotometer

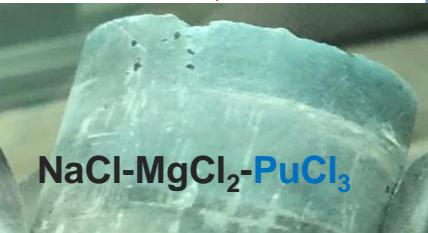
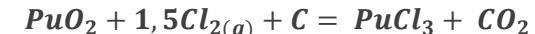
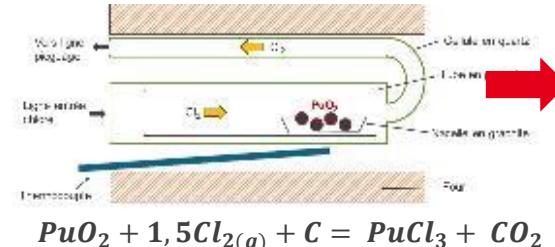


## Electrochemistry studies of molten salts with actinides

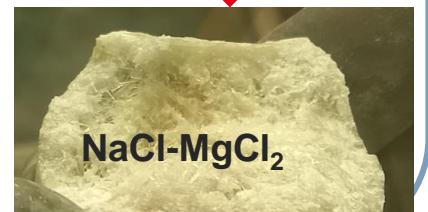
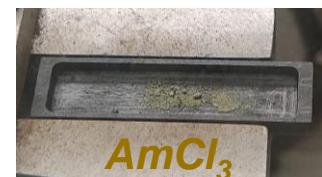


## Synthesis of actinide chlorides and cycle studies

Carbochlorination line



Recovery of 99.5% of Pu contained in NaCl-MgCl<sub>2</sub>-PuCl<sub>3</sub> by pyrometallurgy





# France 2030: a call for projects to bring out new industrial actors and new concepts of « innovative nuclear reactors »

## Roles of the CEA

- Develop the ecosystem and ideation → BOOTCAMP on MSR
- Support projects/start-ups in their development
  - Help during the set up phase
  - Technical support of laureates if requested (on the basis of the expression of needs coming from the industrialist)



is already laureate

## [2022] - Bring out projects within the CEA

→ 4 start-up including one MSR project





# The CEA technical support to France 2030 laureates

CEA is a R&D operator – performing activities in the following areas :

- Targeted contributions in the scope of CEA skills (studies/scientific calculations, S&T roadmap, ...)
- Calculation tools : **specifically for MSR, a development program over 10 years and more**  
1<sup>st</sup> phase = development/adaptation of existing tools ->tools for design (early phase)  
Ultimately = validation of data/models by comparison to experimental results (prerequisite : to have the experimental material) ->validated tools for detailed design and licensing
- Experimental programs for knowledge acquisition, **specifically for MSR**  
**Axis 1** : PuCl<sub>3</sub> synthesis, fresh and irradiated fuel properties, salts and materials behaviour under irradiation, FP chemistry  
**Axis 2** : Structural materials, specification, characterization up to codification, irradiation damages, corrosion  
**Axis 3** : modelling of all phenomena in physics/chemistry and interactions (correlations, laws, etc.) ..  
Identification of the needs + pre-feasibility study of a critical experience like the MCRE in the US.  
**Axis 4** : technological development, a gradual component approach starting with small scale component, rising from TRL 3 to 5/6, ...

CEA will not do reactor design (engineering studies...) or safety demonstration



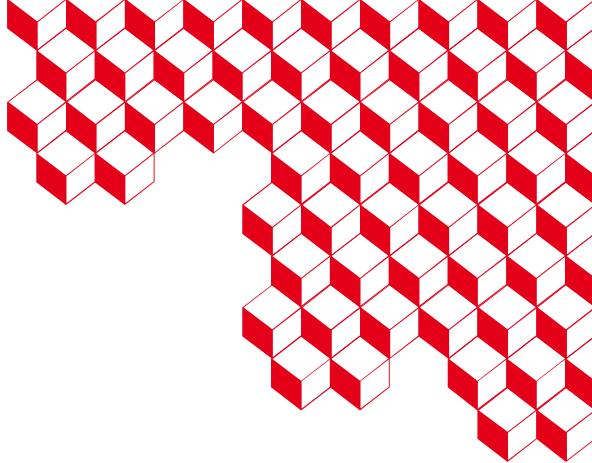
# The international collaborations

*Fast MSR is a challenging innovation*

A research program exists already in France (ISAC project and France 2030 initiatives) ; It will structure the roadmap of development for CEA and French actors

Because the volume of activities is very large, because there are complementarities of skills and experimental capacities, international collaborations are necessary

The Euratom framework is very appropriate to enlarge activities at the EU level



Bootcamp on MSR - Oct. 2022, Avignon, 160 participants

**Thank you for your attention**